

现代车辆新能源与 节能减排技术



第2版

XIANDAI CHELIANG XINNENGYUAN YU
JIENENG JIANPAI JISHU

|| 主编 李明 刘楠



混合动力汽车 / 纯电动汽车 / 燃料电池汽车 / 混合动力列车
动力电池技术 / 燃料电池技术 / 能效提升技术



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代车辆新能源与节能减排技术

第2版

主 编 李 明 刘 楠

副主编 李 进 石俊杰 司志强 唐 慧

主 审 张秋敏



机 械 工 业 出 版 社

新能源与节能减排技术是目前交通行业大力发展的新兴技术。现代车辆采用新能源技术以达到节能减排的目的,这已成为当今世界车辆技术的发展趋势。目前,电动汽车在国内外市场上已得到较成熟的应用,混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车、混合动力有轨电车在欧洲、日本和中国已迅速发展为新兴产业。

《现代车辆新能源与节能减排技术 第2版》针对现代交通行业新能源技术,分九章讲解了新能源技术发展现状、混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车、混合动力有轨电车和燃料电池有轨电车的技术特征,以及动力电池、超级电容和燃料电池等新能源供电部件的基础知识及应用技术。

本书从汽车行业、轨道车辆行业及动力电池、超级电容和燃料电池产品基础知识和应用状况出发,结合节能减排方面的国家政策规划,由浅入深地讲解了新能源技术研究及应用现状,为汽车、轨道交通、电动自行车、电动摩托车、动力电池、超级电容和燃料电池等行业的技术人员和维护人员提供参考。本书也可作为相关科研院所研究人员、高校师生等学习新能源车辆技术的入门教程或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代车辆新能源与节能减排技术/李明,刘楠主编.—2版.
—北京:机械工业出版社,2018.6
ISBN 978-7-111-59930-2

I. ①现… II. ①李… ②刘… III. ①新能源—汽车—研究
②汽车节油—研究 IV. ①U469.7②U471.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第097671号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:杜凡如 孟阳 责任编辑:杜凡如 孟阳

责任校对:王明欣 封面设计:张静

责任印制:常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张·384千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-59930-2

定价:49.8元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

现代交通运输工具，如汽车、城市轨道车辆等，为现代社会的发展和人类生活流动性需求做出了重大贡献。目前，城市轨道车辆多采用电力驱动，对环境影响不大，但汽车的大量使用对环境造成了巨大影响。全球范围内汽车的大规模应用，已经产生并正在继续引发严重的环境与人类生存问题。大气污染、全球变暖及石油资源的迅速消耗，成为当前人们关注的重点问题。

新能源与节能减排技术是目前国内外交通行业大力发展的新兴技术。随着动力电池、超级电容和燃料电池等新能源供电部件功率密度、能量密度及充放电效率等技术水平的提升，现代车辆已开始逐渐采用动力电池、超级电容和燃料电池等新能源材料作为车辆起动、加速、长距离运行和能量回收的替代能源。混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动力有轨电车在欧洲、日本和中国已迅速发展为政府重点扶持的新兴产业。

本书针对现代交通行业新能源技术，分别讲解了新能源技术发展现状及节能减排技术，混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车、混合动力有轨电车和燃料电池有轨电车的技术特征，以及动力电池、超级电容和燃料电池等新能源供电部件的基础知识及应用技术。全书共9章，第1章主要介绍现代交通新能源技术发展现状；第2章主要介绍混合动力汽车相关技术；第3章主要介绍纯电动汽车相关技术；第4章主要介绍燃料电池汽车相关技术；第5章主要介绍混合动力有轨电车相关技术；第6章主要介绍燃料电池有轨电车相关技术；第7章主要介绍动力电池基础知识及应用情况；第8章主要介绍超级电容基础知识及应用情况；第9章主要介绍燃料电池基础知识及应用情况。本书可为汽车、轨道交通、电动自行车、电动摩托车、动力电池、超级电容等行业的技术人员和维修人员提供参考，也可作为相关科研院所研究人员、高校师生等学习新能源汽车技术的入门教程或参考书。

本书由李明、刘楠任主编，李进、石俊杰、司志强和唐慧任副主编。此外，参与编写的还有邵蓉、汪星华、侯红学、蒋洁、刘斌、邵其方、解雪林、周德来、唐晨、陈倩倩、姚峰、裴春兴、王玮、郑勇、梁刚、韩璐、万翠英、李欣伟、杨耀华和彭涤曲。由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，欢迎广大读者指正，以便做进一步修改和补充。

编 者

目 录



前言

第 1 章 现代交通新能源技术发展现状..... 1

- 1.1 现代交通运输对环境的影响 1
 - 1.1.1 环境污染 1
 - 1.1.2 全球变暖 2
 - 1.1.3 能源现状 2
- 1.2 新能源汽车发展现状与趋势 4
 - 1.2.1 新能源汽车的种类 4
 - 1.2.2 国内新能源汽车发展现状 13
 - 1.2.3 汽车行业节能减排技术研究现状 15
- 1.3 轨道交通行业新能源技术发展现状与趋势 24
 - 1.3.1 轨道交通行业发展现状 24
 - 1.3.2 有轨电车新能源技术的技术优势 24

第 2 章 混合动力汽车技术 26

- 2.1 混合动力汽车的类型与特点 26
 - 2.1.1 混合动力汽车的定义与分类 26
 - 2.1.2 混合动力汽车的特点 28
 - 2.1.3 插电式混合动力汽车 29
 - 2.1.4 混合动力汽车的关键技术 30
- 2.2 混合动力汽车的结构原理 32
 - 2.2.1 串联式混合动力汽车 32
 - 2.2.2 并联式混合动力汽车 34
 - 2.2.3 混联式混合动力汽车 36
- 2.3 混合动力汽车能量管理 38
 - 2.3.1 混合动力汽车的能量传递路线 38
 - 2.3.2 混合动力汽车的能量控制策略 38
 - 2.3.3 混合动力汽车的制动能量回收系统 41

第 3 章 纯电动汽车技术 43

- 3.1 纯电动汽车技术发展与产业化面临的问题 43
- 3.2 纯电动汽车的特点与结构原理 45
 - 3.2.1 纯电动汽车的类型与特点 45
 - 3.2.2 纯电动汽车的结构原理 46
 - 3.2.3 纯电动汽车驱动系统布置形式 48
 - 3.2.4 纯电动汽车驱动系统设计 49
- 3.3 纯电动汽车的核心技术 51
 - 3.3.1 动力电池技术 51
 - 3.3.2 电机驱动及控制技术 52
 - 3.3.3 能量管理技术 53





3.3.4 整车轻量化技术	54
3.4 纯电动汽车能量管理与利用	54
3.4.1 纯电动汽车的能量管理系统	54
3.4.2 纯电动汽车充电装置	55
3.4.3 纯电动汽车的再生制动能量回收	57
第4章 燃料电池汽车	60
4.1 燃料电池汽车的类型与结构原理	60
4.1.1 燃料电池汽车的类型	60
4.1.2 燃料电池汽车的结构原理	63
4.2 燃料电池汽车电驱动系统及控制策略	67
第5章 混合动力有轨电车技术	69
5.1 概述	69
5.1.1 国内外混合动力轨道车辆	69
5.1.2 混合动力轨道车辆技术分析	73
5.1.3 混合动力轨道车辆应用前景分析	75
5.2 混合动力系统组成及技术参数	76
5.2.1 DC/DC 变换器主要技术参数	76
5.2.2 混合动力电源箱主要技术参数	77
5.2.3 牵引逆变器	77
5.2.4 制动电阻	78
5.2.5 牵引电机	78
5.3 混合动力系统性能参数估算	78
5.3.1 混合动力系统相关参数	78
5.3.2 车辆纵向动力学分析模型	81
5.3.3 系统参数匹配计算方法	84
5.3.4 储能设备能力计算	86
5.3.5 动力电池及超级电容数量的确定	89
5.3.6 制动能量回收	91
5.4 双向 DC/DC 变换器工作原理	91
5.4.1 双向 DC/DC 变换器的工作要求	92
5.4.2 双向 DC/DC 变换器拓扑结构的选择	92
5.4.3 双向 DC/DC 变换器模型	93
5.5 复合电源系统工作原理及仿真分析	97
5.5.1 超级电容与蓄电池模型	98
5.5.2 复合电源系统控制方式	100
5.5.3 复合电源功率分配控制策略	101
5.5.4 功率流分配策略算法	104
5.6 混合动力有轨电车运行仿真研究	105
5.6.1 混合动力仿真软件	105
5.6.2 国内某线路的混合动力方案设计	108
第6章 燃料电池有轨电车技术	118
6.1 氢燃料电池轨道车辆效益分析	118
6.1.1 社会经济效益	118



6.1.2 节能减排效益	118
6.2 混合动力系统组成及技术参数	119
6.3 混合动力系统详细设计方案	120
6.3.1 车辆设备布局优化设计	120
6.3.2 混合动力电源箱 DC/DC 主要技术参数	121
6.3.3 超级电容组技术参数	122
6.3.4 动力电池组技术参数	123
6.3.5 燃料电池系统技术参数	123
6.4 混合动力系统匹配设计与牵引特性分析	125
6.4.1 牵引特性分析	125
6.4.2 能量控制策略	126
6.5 混合动力系统集成设计技术	130
6.5.1 气路接口	130
6.5.2 冷却接口	131
6.5.3 电气/机械接口	132
6.5.4 冷启动系统	137
6.5.5 防冻保护	138
6.5.6 氢气泄漏检测	138
6.6 能量综合利用技术	138
6.6.1 动力电池箱引空调风冷却	138
6.6.2 余热利用	145
第7章 动力电池基础知识及应用技术	148
7.1 动力电池的基本构成及性能指标	148
7.1.1 动力电池的类型	148
7.1.2 动力电池的基本构成	149
7.1.3 动力电池及电池组的相关概念	151
7.1.4 动力电池的性能指标	151
7.1.5 电动车辆对动力电池的要求	156
7.2 锂电池结构与工作原理	159
7.2.1 锂电池的种类与特点	160
7.2.2 锂电池的结构与工作原理	161
7.2.3 锂电池的充放电特性	163
7.2.4 锂电池的充放电方法	164
7.2.5 锂电池的模型	168
7.2.6 锂电池的热特性与冷却方法	170
7.2.7 锂电池的失效机理及失效模式	174
7.2.8 锂电池使用安全性的影响因素	177
7.2.9 磷酸铁锂电池的外特性	178
7.2.10 动力电池使用寿命的影响因素	180
7.3 动力电池管理系统	182
7.3.1 动力电池管理系统的基本构成和功能	182
7.3.2 动力电池管理系统的设计	186
7.3.3 动力电池状态监测的相关问题	187



7.3.4 动力电池均衡控制管理	189
7.4 动力电池的特性测试	193
7.4.1 动力电池特性测试的内容	193
7.4.2 动力电池特性测试的相关标准及主要测试项目	197
7.4.3 动力电池特性测试的相关仪器设备	200
7.4.4 动力电池特性仿真分析工具	201
7.5 动力电池 SOC 的评估	203
7.5.1 动力电池 SOC 评估的作用	203
7.5.2 动力电池 SOC 的评估方法	203
7.5.3 动力电池 SOC 评估的难点	206
7.5.4 提高动力电池一致性的措施	208
7.6 动力电池组的匹配设计	208
7.6.1 电动车辆能耗经济性评价参数	208
7.6.2 动力电池组的功能要求	211
7.6.3 动力电池梯次利用与回收	211
7.7 国内外产品及主要厂家	212
7.7.1 国外产品及厂家	213
7.7.2 国内产品及厂家	215
第8章 超级电容基础知识及应用技术	217
8.1 超级电容结构与工作原理	217
8.1.1 超级电容的种类	217
8.1.2 超级电容的结构原理	218
8.1.3 超级电容的技术指标	220
8.1.4 超级电容的数学模型	221
8.1.5 超级电容的应用特性	222
8.2 超级电容在新能源车辆上的应用	224
8.2.1 超级电容在纯电动车辆上的应用	224
8.2.2 超级电容在混合动力汽车上的应用	224
8.2.3 超级电容使用注意事项	225
第9章 燃料电池基础知识及应用技术	227
9.1 燃料电池概述	227
9.1.1 燃料电池的种类	227
9.1.2 几种典型的燃料电池	230
9.1.3 燃料电池的优缺点	233
9.1.4 有轨电车用燃料电池急需解决的问题	234
9.2 燃料电池系统结构与工作原理	234
9.2.1 燃料电池的工作原理	234
9.2.2 质子交换膜燃料电池系统的组成	236
9.2.3 氢气系统概述	238
9.3 燃料电池系统的失效分析	241
9.3.1 燃料电池系统失效方式	241
9.3.2 燃料电池系统的控制系统	242
参考文献	244

现代交通新能源技术发展现状



1.1 现代交通运输对环境的影响

1.1.1 环境污染

目前,大部分燃油类地面交通车辆依靠碳氢化合物类燃料的燃烧,来获得驱动能量。很多情况下,热力发动机内的碳氢化合物类燃料燃烧是非理想化的,即除生成二氧化碳(CO_2)和水(H_2O)外,还含有一定量的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、铅(Pb)、细微颗粒物及硫化物等,这些生成物不仅污染环境,对人体也是有危害的。此外,这些一次污染物还会通过大气化学反应生成光化学烟雾、酸沉降等二次污染物。全球大气污染的42%源于交通车辆产生的污染。随着城市机动车数量的快速增长,机动车排放的尾气已成为城市大气污染的主要污染源。一些机动车排放的污染物对多项大气污染指标的贡献率已达70%。综上,必须研究改善城市机动车排放污染的对策和措施。

主要机动车排放污染物对环境的影响情况见表1-1-1。

表 1-1-1 主要机动车排放污染物对环境的影响情况

污 染 物	对环境的影响情况
氮氧化物	虽然氮是惰性气体,但发动机内的高温和高压环境易使其反应生成氮氧化物(NO_x)。其中最易生成的氮氧化物是一氧化氮(NO), NO 排放到空气中会与氧反应生成二氧化氮(NO_2)。在紫外线辐射下, NO_2 又会分解为 NO ,并生成攻击活细胞薄膜的、有高度活性的氧原子。 NO_2 在一定情况下会形成有刺激性的褐色烟雾,其对人体最突出的危害是刺激眼睛和上呼吸道黏膜。 NO_2 与空气中的水反应会生成硝酸(HNO_3), HNO_3 在雨中稀释,形成酸雨,对人类生活造成巨大影响。在工业化国家中,酸雨会破坏森林,对由大理石建造的历史遗迹也会产生腐蚀作用。
一氧化碳	一氧化碳是碳氢化合物不完全燃烧生成的气体。一氧化碳与血液中的血红蛋白结合的速度比氧快250倍。一氧化碳一旦接触人和动物的血细胞,就会替代氧附着于血红蛋白上,很快就会减少器官的氧供给量,并导致体力和智力下降,危害中枢神经系统,造成感觉、反应、理解、记忆力等机能障碍,重者会危害血液循环系统,导致生命危险。
未完全燃烧的碳氢化合物	未完全燃烧的碳氢化合物对生命体是有害的,其中有些是直接的毒物或致癌的化学制品,如颗粒状物、苯等。未完全燃烧的碳氢化合物还会催生烟雾:日光中的紫外线与未完全燃烧的碳氢化合物及大气中的一氧化氮互相作用,生成臭氧等物质。臭氧是无色的,非常危险,当它侵入活细胞薄膜时,会加速生命体的老化或产生致死的毒物。



(续)

污 染 物	对环境的影响情况
其他污染物质	燃料中的杂质会随尾气一起排放，主要的杂质是硫，它存在于汽油和柴油等燃料中。硫（或硫的化合物，如硫化氢）同氧一起燃烧会生成硫化物（SO_x）。其中，二氧化硫（SO_2）是主要生成物，当其与空气接触时，会产生三氧化硫（SO_3），如果三氧化硫和水反应，则会生成硫酸，这是酸雨的主要成分。 为改善发动机的性能或寿命，石油公司在其燃料产品中会添加人工化合物。四乙基铅（常简称为铅）用于改善汽油的抗爆性，然而它燃烧后会析出铅金属，而铅金属会导致神经系统疾病。

1.1.2 全球变暖

受人类活动的影响，温室气体和硫化物气溶胶的浓度增加过快，有科学家预测，未来100年全球平均地表温度将上升 $1.4 \sim 5.8^\circ\text{C}$ 。

全球变暖是“温室效应”的结果，而“温室效应”是由二氧化碳和其他温室气体（如大气中的甲烷）所引发的。这些气体吸收了由地面反射的日光波谱的红外辐射，使自身升温。地球温度升高会破坏生态系统，引发影响人类的许多自然灾害，加剧气候变化风险。

近几十年的观测表明，人类活动是造成气候变暖的主要原因之一。人类社会对能源的大量消耗带来了温室气体排放问题，而气候变暖正源于大气中聚集了二氧化碳等大量温室气体。二氧化碳是碳氢化合物和煤燃烧的产物，是全球最重要的温室气体，是造成气候变暖的主要原因。虽然二氧化碳可被植物吸收，并由海洋以化合成碳酸盐的方式收集，但这些自然同化过程是有限的，不可能同化所有已排放的二氧化碳，其结果是在大气中形成二氧化碳的累积。

交通领域的二氧化碳排放问题是我们关注的重点。据国际能源机构（International Energy Agency，简称IEA）估计，城市机动车二氧化碳总排放量将从1990年的29亿吨增加到2020年的60亿吨。可见，机动车对地球环境造成了巨大影响。

控制消费和节约能源是减少二氧化碳排放量的重要途径。仅在工业发达国家，人均能源消费指数为1~3不等，这表明节约能源的余地是极大的。当然，还可以考虑保持适当的消费水平，同时用那些不会产生温室效应的能源来取代那些会造成污染的能源。

为减少机动车对全球气候变暖的影响，削减二氧化碳的排放量，机动车应尽量采用小排量发动机和稀薄燃烧发动机，最大限度地提高能源利用效率。目前，各国已开始制定并实施城市机动车二氧化碳排放法规。2008年，欧盟要求小型汽车二氧化碳排放量不高于 140g/km ，对于汽油车，对应的油耗是 $6\text{L}/100\text{km}$ 以下；2012年，不高于 120g/km ；2020年，不高于 100g/km 。如果我国大力推广一系列新能源技术，包括电动汽车技术、天然气汽车技术和以天然气为燃料的内燃机技术，到2030年，我国机动车的二氧化碳排放总量有可能降低45%。

1.1.3 能源现状

石油是从地下采掘的矿物燃料，是活性物质分解后的产物，这些物质几百万年前被埋藏在稳定的地质层中。其变化过程大致如下：活性物质（主要是植物）死亡，并慢慢地被沉



积物所覆盖。这些沉积物日积月累形成半固体层，且变态为岩石。活性物质就封存在一个密闭的空间内，在高压和高温作用下，缓慢地转化为碳氢化合物或煤等物质。

地球能源主要包括石油、天然气和煤炭等，而目前全球交通运输业的燃料绝大部分来自石油及其衍生品——汽油和柴油等。根据2017年《BP世界能源统计年鉴》发布的数据，2016年，全球探明石油储量增加了150亿桶（0.9%），总量达到1.707万亿桶，按照2016年产量水平，能满足全球50.6年的产量。全球石油用量增长强劲，增幅1.6%，日用量增加160万桶，连续第二年高于10年平均增速。

全球探明煤炭储量足够满足153年的全球产量，大约是石油和天然气储量的三倍。分地区而言，亚太地区拥有最多的探明储量（占总量的48.5%），其中我国的储量占全球总量的21.4%。

截至2016年底，全球天然气探明储量为186.6万亿 m^3 ，增加了1.2万亿 m^3 （0.6%）。与石油储量相似，这一储量也可保证多于50年的全球产量。

根据2017年《BP世界能源统计年鉴》发布的数据，我国占全球能源消费量的23%，全球能源消费增长量的27%，仍然是世界上最大的能源消费国。尽管煤炭仍是我国能源消费中的主要燃料（占比为62%），但是其产量下降了7.9%，创下自1981年开始追踪产量数据以来的最大年度降幅。预计到2020年，我国能源消费总量约为45.9亿吨标准煤，其中煤炭占一次能源比重降至58.2%，天然气比重升至8.9%，非化石能源比重升至15%。

石油的消耗量（对应的生产量）与发达国家和发展中国家的经济增长同步逐年增加。其中，随着某些人口大量聚居国家的迅速发展，石油消耗量很可能大幅增加，特别是在亚太地区。而石油消耗量激增，将导致污染物迅速扩散和二氧化碳排放量成正比增加。

石油在交通领域的消费逐年增长。国际能源机构（IEA）的统计数据表明，2001年全球57%的石油消费在交通领域（其中美国达到67%）。预计到2020年，交通用油将占全球石油总消耗量的62%以上。美国能源部预测，2020年后，全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口，2050年的供需缺口几乎相当于2000年全球石油总产量的两倍。

我国是一个能源短缺的国家，已探明石油储量约160亿桶，约占全球储量的1.1%，但同时又是一个能源消费大国。我国的石油消耗量仅次于美国，位居世界第2位，石油消费年均增长率达6%以上。

目前全球汽车保有量约9亿辆，预计到2030年汽车保有量将突破20亿辆，主要增量来自发展中国家。我国汽车产量逐年增加，2009年我国共生产汽车1379万辆，居世界第1位，而且远远领先于排名第2位的日本（793.45万辆）。此后我国已连续数年成为世界第一汽车生产大国和第一新车销售市场。

我国汽车保有量也增加迅速，预计到2020年，全国汽车保有量将达1.75亿辆。在石油进口依存度持续上升的情况下，国际石油价格直接影响到我国的能源安全、经济安全乃至国家安全。

在交通领域，汽车消费的快速增长导致石油消耗量加速增长。我国机动车燃油消耗量约占全国总油耗的1/3，这也使我国的石油对外依存度每年都在攀升。有关资料显示，目前我国石油消耗的60%以上依赖进口，到2020年将增至76%。此外，汽车的汽油消耗量约占全国总消耗量的87%，柴油消耗量则占全国总消耗量的38%左右。从我国单车耗油量来看，单车平均耗油量的实际值约2.5吨，比美国高10%~25%，比日本高1倍以上。



1.2 新能源汽车发展现状与趋势

全球石油资源加速递减、大气污染和温室效应引发的全球变暖，已成为亟待解决的世界性难题。交通运输领域的石油消耗量已占到世界石油总消耗量的近 60%，因此各种交通工具的“节能减排”成为解决这一难题的关键。相关领域的科研和工程人员正致力于清洁能源和提高能源利用效率的研究。从车辆自身出发，提高车辆的能量利用效率是降低能源消耗最直接有效的方法之一。近年来，混合动力技术已广泛应用于交通运输领域，采用相关技术的新能源汽车大有替代传统车辆的趋势。

新能源汽车被认为是向可再生运输转变的推动者。相比传统动力系统，混合动力系统减少，甚至避免了对石油、煤矿资源的消耗。混合动力系统的共同特性是动力系统中存在能量储存装置。而混合能量储存装置是将两个或多个能量储存装置组合在一起，以使每一个能量储存装置都能发挥优势。例如，动力电池和超级电容的组合方式，便可克服动力电池低比功率和超级电容低比能量的缺点，从而获得高比能量和高比功率。混合动力系统的另一个重要特性是具有回收制动能量的能力。制动时，混合动力系统将车辆的动能或势能转换为电能，并存储到储能装置中。通过优化能量管理策略，可以在保证车辆性能的情况下尽可能多地回收制动能量，进而提高能量利用率。目前，混合动力技术在新能源汽车领域应用越来越多，也越来越成熟。

1.2.1 新能源汽车的种类

节能、低排放的新能源汽车又称清洁能源汽车，其包括的范围较广，一般可分为电动汽车、气体燃料汽车、生物燃料汽车和氢燃料汽车等。新能源汽车具有燃料利用率高、低排放或零排放等特点。新能源汽车的分类和产业链分别如图 1-2-1 和图 1-2-2 所示。

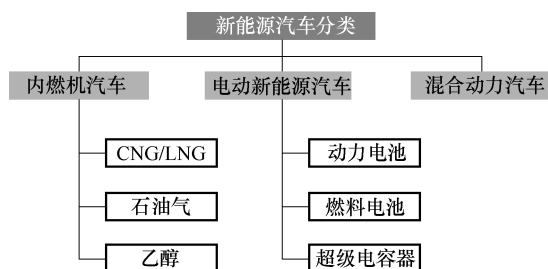


图 1-2-1 新能源汽车的分类



图 1-2-2 新能源汽车产业链



(1) 电动汽车

电动汽车包括纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池电动汽车。纯电动汽车指以动力电池为储能单元，以电动机为驱动系统的汽车。图1-2-3所示为一款新概念纯电动汽车。混合动力汽车指同时装备两种动力源——热动力源（由传统的汽油机或柴油机产生）与电动力源（动力电池与电动机）的汽车。燃料电池电动汽车指以燃料电池作为电源的电动汽车。



图1-2-3 新概念纯电动汽车

(2) 气体燃料汽车

气体燃料汽车指以可燃气体作为能源的汽车。根据可燃气体的形态不同，可分为3种：

- 压缩天然气（Compressed Natural Gas, CNG），主要成分为甲烷。
- 液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG），甲烷经深度冷却液化。
- 液化石油气（Liquefied Petroleum Gas, LPG），主要成分是丙烷和丁烷的混合物。

气体燃料汽车一般分3种，即专用气体燃料汽车、两用燃料汽车和双燃料汽车。

专用气体燃料汽车是以液化石油气、天然气或煤气等气体为发动机燃料的汽车，如天然气汽车、液化石油气汽车等，这种汽车可以充分发挥天然气理化性能特点，价格低、污染少，是最清洁的汽车。

两用燃料汽车具有两套相对独立的供给系统，一套供给天然气或液化石油气，另一套供给天然气或液化石油气之外的燃料，两套燃料供给系统可分别但不可共同向气缸供给燃料，如汽油/压缩天然气两用燃料汽车、汽油/液化石油气两用燃料汽车等。

双燃料汽车具有两套燃料供给系统，一套供给天然气或液化石油气，另一套供给天然气或液化石油气之外的燃料，两套燃料供给系统按预定的配比向气缸供给燃料，在气缸混合燃烧，如柴油-压缩天然气双燃料汽车、柴油-液化石油气双燃料汽车等。

(3) 生物燃料汽车

生物燃料汽车指使用燃用生物燃料或燃用掺有生物燃料的燃油的汽车。与传统汽车相比，生物燃料汽车结构上无重大改动，但排放总体较低，如乙醇燃料汽车和生物柴油汽车等。

(4) 氢燃料汽车

氢燃料汽车指以氢为主要能量的汽车。一般汽车使用汽油或柴油作为内燃机燃料，而氢燃料汽车则使用气体氢作为内燃机的燃料。

氢内燃机在汽车上的应用方式有以下3种：

1) 纯氢内燃机。纯氢内燃机只产生 NO_x 排放，但中、高负荷时存在爆燃问题，且 NO_x 生成量远大于汽油机，发动机功率受限且氢气消耗量大，续驶里程短，这些问题均需要进一步研究解决。

2) 氢/汽油两用燃料内燃机。可根据燃料的存储状况灵活选择汽油和氢进入纯汽油或纯氢内燃机模式。

3) 氢-汽油双燃料内燃机。它可将少量氢气作为汽油添加剂混入空气中，氢气扩散速率大，能促进汽油的蒸发、雾化和与空气的混合。氢燃烧过程中产生活性自由基，能使汽油



火焰传播速度明显加快,得到较高的热效率,并产生较低的排放。

除以上种类外,新能源汽车还包括利用太阳能、核能等其他能量形式的汽车。

1.2.1.1 纯电动汽车

纯电动汽车指完全由动力电池提供动力,用电动机驱动车轮的电动汽车,目前主要采用镍氢电池和锂电池作为储能部件。虽然纯电动汽车已有 130 多年的悠久历史,但由于多数蓄电池普遍存在价格高、寿命短、外形尺寸和重量大、充电时间长等严重缺点,一直仅限于某些特定范围的应用,市场较小。纯电动汽车在中、美、日、欧等国家和地区已得到商业化推广,目前世界上有近 5 万辆纯电动汽车在运行,主要应用在市政用车、公交车、公务用车和私人用车等领域。纯电动汽车的技术攻关重点集中在提高蓄电池性能、降低成本方面。纯电动汽车的优点如下:

- 1) 无内燃机汽车工作时产生的废气,不产生排气污染,电动机的运转噪声也较内燃机小,同时可回收制动、下坡时的能量,能量利用效率高,对保护环境十分有益。
- 2) 与内燃机汽车相比,纯电动汽车结构简单,运转、传动部件少,维修保养工作量小,能量转换效率高。
- 3) 只要有电力供应的地方,纯电动车一般就可以通过家用电源或专业充电设备进行充电。同时,使用电力较燃油的成本更低。
- 4) 纯电动汽车可在夜间利用电网的廉价“谷电”进行充电,起到平抑电网峰谷差的作用。

纯电动汽车的不足如下:

- 1) 动力电池的性能指标还有待提升,生产一致性有待提高。
- 2) 动力电池耐高、低温性能差,要求的运用维护措施较多,限制了推广应用。
- 3) 与内燃机汽车相比价格较高,优势不明显。
- 4) 很难利用现有加油站资源,基础设施建设成本较高。

随着高性能锂电池性价比的不断提升,未来 5~10 年内,市场可能会出现最高车速大于 200km/h,续航里程大于 500km 的高性能纯电动汽车。

1.2.1.2 混合动力汽车

混合动力汽车指由多于一种的能量转换器提供驱动动力的混合型电动汽车(一般为内燃机和蓄电池或超级电容)。混合动力汽车按混合方式不同,可分为串联式混合动力汽车(SHEV)、并联式混合动力汽车(PHEV)和混联式混合动力汽车(SPHEV)三种;按混合度(电动机功率与内燃机功率之比)的不同,又可分为微混合、轻度混合和全混合三种;按燃料种类的不同,又可分为汽油混合动力汽车和柴油混合动力汽车两种。目前,国内市场上混合动力汽车的主流是汽油混合动力,而国际市场上柴油混合动力车型发展也很快。

混合动力汽车最突出的优势是燃油经济性好,可按平均需用的功率确定内燃机的最大功率,使内燃机在油耗低、污染少的最优工况下工作,一般可比传统燃料汽车节约燃油 30%~50%,并显著降低排放。

1.2.1.3 超级电容汽车/公交车

超级电容是利用双电层原理的电容器。在超级电容两极板电荷产生的电场作用下,电解液与电极间的界面上形成相反的电荷,以平衡电解液的内电场,正电荷与负电荷在两个不同相之间的接触面上,以正负电荷之间极短间隙排列在相反的位置上,该电荷分布层叫作双电



层，因此电容量非常大。

以超级电容作为新能源汽车（图 1-2-4）的供电电源，优点是充电时间短、功率密度大、容量大、使用寿命长、免维护、无记忆、环保程度高等，目前其运营成本仅为柴油车的 1/3 左右。但其缺陷是功率输出随行驶里程加长而衰减，只适合短程运行。因此，超级电容大部分用于公共交通领域，或作为纯电动汽车或燃料电池汽车的辅助电力系统。超级电容汽车的超级电容一般安装在底盘上，车辆进站后的上下客间隙，车顶充电设备自动升起，搭到充电站的电缆上，通过 200 ~ 400A 的充电电流完成充电，充电时间一般为 20 ~ 30s。



图 1-2-4 超级电容公共汽车

1.2.1.4 燃料电池汽车

燃料电池汽车指以氢气等为燃料，通过化学反应产生电流，依靠电动机驱动的汽车。其蓄电池的能量是通过氢气和氧气的化学反应获得的，无需经过燃烧，因此能量转化效率比内燃机要高 2 ~ 3 倍。燃料电池的化学反应过程不会产生有害产物且噪声低，因此燃料电池汽车也属于无污染汽车。从能源利用和环境保护方面看，燃料电池汽车是一种理想车辆，代表着清洁汽车未来的发展方向，战略意义十分重大。

1.2.1.5 气体燃料汽车

气体燃料汽车包括天然气汽车和液化石油气汽车。

(1) 天然气汽车

天然气汽车指以天然气作为燃料的汽车。按照所使用天然气燃料状态的不同，天然气汽车可分为压缩天然气汽车（CNGV）和液化天然气汽车（LNGV）。

液化天然气指常压下、温度为 -162°C 的液体天然气，储存于车载绝热气瓶中。液化天然气燃点高、安全性能强，适于长途运输和储存。

压缩天然气指压缩到 20.7 ~ 24.8MPa 的天然气，储存在车载高压气瓶中。它是一种无色透明、无味、高热量、比空气轻的气体，主要成分是甲烷，由于组分简单，易于完全燃烧，加上燃料抗爆性好、不稀释润滑油，能够延长发动机的使用寿命。目前世界上使用较多的是压缩天然气汽车。

与同功率的传统燃油汽车相比，天然气汽车尾气中的碳氢（HC）排放量可减少 90%，一氧化碳（CO）可减少约 80%，二氧化碳（CO₂）可减少约 15%，氮氧化物（NO_x）可下降 40%，且没有含铅物质排出。在节能减排方面，天然气汽车的优势不言而喻。因此，大力推广天然气汽车，对于减少城市大气污染、改善空气质量、美化城市环境、提高居民生活水平作用重大。到 2020 年，预计全球将有 6500 万辆天然气汽车，占全球汽车保有量的 8%。

天然气汽车与普通燃油汽车相比，在结构上主要增加了天然气供给系统。天然气供给系统由储气部件、供气部件、控制部件和燃料转换部件组成。天然气汽车具有低污染、低成本、安全性高的特点，但动力性能较差，不易携带，而且一旦大规模投入使用，就必须建立相应的加气站及为加气站输送天然气的管道，涉及城市建设规划、经费投入和环境安全等诸多因素，成本很高。



国内外已投入市场的天然气汽车有梅赛德斯-奔驰 B170 NGT (图 1-2-5), 通用 CAPT IV A, 以及东风雪铁龙推出的新爱丽舍天然气双燃料汽车 (图 1-2-6) 等。



图 1-2-5 梅赛德斯-奔驰 B170 NGT



图 1-2-6 新爱丽舍天然气双燃料汽车

随着材料技术及电子技术的不断发展,天然气的优势会进一步突显。从长远看,天然气将会成为最有前途的车用“低污染燃料”。我国天然气资源丰富,天然气汽车技术发展较快,在天然气资源丰富的地区,天然气汽车比较普及。因此,发展天然气汽车对解决环境问题和能源问题都具有十分重大的现实意义。

(2) 液化石油气汽车

以液化石油气为燃料的汽车称为液化石油气汽车。液化石油气汽车和天然气汽车结构类似,也是增加了一套燃气供给系统。液化石油气汽车与燃油汽车相比,具有污染少、经济性和安全性好等优点,逐渐受到各国的重视。为适应汽车能源变革的大趋势,很多汽车制造商都纷纷投资开发液化石油气汽车,并制订出各种优惠政策,推广使用液化石油气汽车。

国内外已投入市场的液化石油气汽车有澳大利亚霍顿汽车公司开发的汽油/液化石油气双燃料汽车,德国改装厂 AC Schnitzer 推出的 GP3.10 GAS POWERED 液化石油气版宝马 3 系轿跑车等。

(3) 气体燃料汽车技术的优缺点

气体燃料汽车的主要技术包括:

- 1) 燃料的随车携储容器(铝基复合材料、碳纤维玻璃钢材料,重量为钢瓶的 30% ~ 50%),储运、加气站的设备与技术。
- 2) 燃料供给系统与混合燃烧技术。
- 3) 燃气喷射系统及闭环控制技术。
- 4) 内燃机上广泛采用电控喷射技术、增压中冷技术、四气门技术、稀薄燃烧技术等,以减少功率损失(不大于 10%)。

气体燃料汽车的优势:

- 1) 压缩天然气(CNG)是天然气经 20MPa 的压力压缩而成的,是车用天然气燃料的主要储存方式。
- 2) CNG 化学性质较稳定,辛烷值高,抗爆性能好。
- 3) 自燃温度为 680 ~ 750℃,远高于汽油的自燃温度(260 ~ 370℃),安全性较好。
- 4) 减排效果较好,如 CNG 汽车的 CO 排放量比汽油车减少 80% 左右,HC 排放减少 90% 以上,NO_x 减少 35% 以上,是目前减排效果较好的新能源汽车技术路线之一。



5) 由于 CNG 的理化特性同汽油较接近,使用时不需要对原发动机做很大改动,即可转换成 CNG 汽油双燃料汽车。但其系统压力较大,对储气罐及管路阀门等的要求很高。

气体燃料汽车的缺点:

1) 气瓶较重、气体燃料体积能量密度低(如 20MPa 压力下的 CNG 仅为汽油的 30% 左右),因此行驶里程较短,加速性能和动力性能较汽油车弱。

2) 燃气供应容易受到其他用气领域的影响,一旦燃气总供求格局发生变化,将极大影响燃气汽车的使用和原料来源。

3) 加气站和供应网络建设必须先行,且密度和覆盖率要求高于汽柴油加油站。此外,加气站投资规模较大,进口关键设备,如高性能天然气压缩机、脱硫及深度脱水装置等价格昂贵,商业模式不成熟。

1.2.1.6 生物燃料汽车

生物燃料汽车是以生物燃料为能源的汽车。生物燃料又称生态燃料,泛指从植物提取的、适用于内燃机的燃料,主要包括甲醇、乙醇、二甲醚和乙基叔丁基醚等。

(1) 甲醇燃料汽车

甲醇燃料汽车指利用甲醇燃料作为能源的汽车。甲醇作为燃料在汽车上的应用主要有掺烧和纯甲醇替代两种。掺烧指将甲醇以不同的比例(如 M10、M15、M30 等)掺入汽油中,作为发动机的燃料,一般称为甲醇汽油。纯甲醇替代指将高比例甲醇(如 M85、M100)直接用作汽车燃料。

甲醇汽油通常按甲醇含量分为低醇、中醇和高醇 3 类:

1) 低醇汽油。甲醇溶于汽油,按欧盟相关规定,可与汽油通用,甲醇可不标明。当甲醇含量超过 3% 时,应标明甲醇含量。由于甲醇在汽油中的溶解性与温度、含水量及基础汽油组成有关,为保证全溶,要适当添加助溶剂。

2) 中醇汽油。甲醇含量高,必需添加助溶剂。在我国,使用低醇与中醇汽油时,发动机完全不用改型,可与汽油通用。

3) 高醇汽油。除甲醇-汽油万能车外,发动机必须改动,需充分提高压缩比,以发挥甲醇的优点,降低甲醇消耗量,与汽油不能通用。

甲醇的特点如下:

1) 原料来源广泛,可利天然气、劣质煤、焦炭、重油和木柴等原料制取,大型化技术完善,在油价高时竞争力较强。

2) 可在汽油中以不同比例掺用,加油比充天然气更方便。

3) 辛烷值高,可作为抗爆添加剂,因此甲醇汽车的动力性能与燃油汽车相差不多。

4) 运行中尾气排放少,PM 和 NO_x 较汽油、柴油机均大幅下降。目前,福特和丰田等公司已成功开发甲醇 100% 到汽油 100% 可自由切换的灵活燃料汽车,并开始推广。

5) 生产工艺简单、设备少、运输方便。

甲醇汽车是我国新能源汽车战略中的重要组成部分,属于醇醚类汽车的代表,甲醇燃料已被确定为今后 20~30 年的过渡性车用替代燃料。

国内已投入市场的生物燃料汽车有安凯公司的 HFF6104GK39 汽油/甲醇双燃料城市公交车(图 1-2-7),上海华普汽车有限公司的海锋甲醇动力汽车(图 1-2-8)等。但由于欠缺规范性,掺烧甲醇比例不规范也带来了一些负面效果。国家应加大投入,提高支持力度,规



范生产标准，甲醇汽油国家标准一旦颁布，应能快速推动醇醚类汽车的发展。



图 1-2-7 HFF6104CK39 汽油/甲醇双燃料城市公交车



图 1-2-8 海锋甲醇动力汽车

(2) 乙醇燃料汽车

乙醇汽车是以车用乙醇汽油作为主要燃料的汽车，俗称酒精汽车。燃料乙醇与一般的商品乙醇不同，它以玉米、小麦、薯类、高粱、甘蔗和甜菜等为原料，经发酵、蒸馏、脱水后，再添加变性剂变性的乙醇。车用乙醇汽油是把变性的燃料乙醇和组分汽油按一定比例混配形成的汽车燃料。

乙醇汽车的燃料应用方式有 4 种：

- 1) 掺烧方式。即乙醇和汽油掺合应用，不需对内燃机及汽车主要部件进行较大技术改动，目前是乙醇汽车推广应用的主要方式。
- 2) 纯烧方式。即将乙醇作为车用主要燃料（E85 以上）。
- 3) 变性燃料乙醇。指乙醇脱水后，再添加变性剂生成的乙醇，变性燃料乙醇汽车目前处于试验应用阶段。
- 4) 灵活燃料。指既可使用汽油，又可使用乙醇、甲醇等与汽油比例混合的燃料，还可使用氢气，并随时可以切换。

目前除掺烧方式外，其他三种仍处于试验阶段。按照我国 2001 年发布的标准，车用乙醇汽油是用 90% 的组分汽油与 10% 的燃料乙醇调和而成的。车用乙醇汽油的牌号可分为 89 号、92 号和 95 号三个，与 GB 17930—2016《车用汽油》的牌号相同。

汽车使用车用乙醇汽油，油耗变化不大，动力性能也基本不变，但尾气排放有较大改善：CO 排放量下降 30% 以上，HC 排放量下降 10% 以上。

我国从 2003 年开始已经停用以粮食为原料的乙醇项目。

(3) 二甲醚燃料汽车

二甲醚作为环保、清洁、安全的新型替代能源，已经得到国际社会的认可。二甲醚（DME）是一种储运较方便且污染小，可用于压燃式发动机的新燃料，其主要成分是丙烷和丁烷，燃烧时几乎不产生炭烟，颗粒排放也很低。它允许使用较高的废气再循环率（EGR），这可使 NO_x 排放大幅度降低。其原料广泛，可用煤、石油、天然气和生物制取。

对柴油机来说，燃料的自燃温度和低温流动性最为重要，二甲醚的自燃温度比柴油低 15°C ，可在气缸内迅速与空气混合，滞燃期短，有利于发动机的冷起动，且可减少预混合燃烧量。二甲醚的汽化潜热大，约是柴油的两倍，其蒸发能降低混合气温度，进一步降低 NO_x 排放。因此，二甲醚是汽车发动机，特别是柴油发动机的理想替代燃料。



由于二甲醚具有低沸点、高饱和蒸气压、低黏性、优良的压缩性、高十六烷值、含氧 34.8%、较低热值等特点，燃用二甲醚的汽车可满足美国 ULEV 和欧Ⅲ排放法规。近年来，很多国家都十分看好二甲醚燃料汽车的市场前景和环保效益，纷纷开展了二甲醚燃料发动机与汽车的研发。在欧洲，沃尔沃公司研制出燃用二甲醚燃料的大客车样车用于示范；在日本，JFE、产业技术综合研究所、COOP 低公害车开发会社、交通公害研究所、五十铃汽车公司和伊藤忠会社等，分别研制出多辆燃用二甲醚燃料的货车样车和城市客车样车，并计划在 3~5 年内小规模推广。

我国的相关研发工作与上述国家基本同步。2005 年 4 月，在国家科技攻关项目支持下，上海交大与上汽集团、上海柴油机股份有限公司、上海华谊集团合作，成功开发出具有完全自主知识产权的 D6114 二甲醚燃料发动机和二甲醚城市客车。

然而，二甲醚汽车也存在一些不足。由于二甲醚黏度比柴油低，用于一般柴油机燃油系统时易泄漏，并恶化滑动部件的润滑效果，容易引起磨损。同时，其可压缩性随温度变化大，易导致循环供料量波动。目前的解决方法是加入适量的有助于增加黏度的添加剂，以保证准确的每循环喷射量。此外，二甲醚虽无腐蚀性，但会与弹性体材料发生反应，导致密封件损坏。此外，目前尚未解决批量合成技术及成本较高的难题。

1.2.1.7 太阳能汽车

太阳能汽车是利用太阳能电池将太阳能转换为电能驱动行驶的汽车。汽车行业多利用光伏发电技术，将太阳能转化为电能驱动汽车。目前以单晶硅电池为主，预计 2020 年可实现晶体硅电池和薄膜电池共同应用的格局，之后再进一步发展到多层复合砷化镓太阳能电池。当前我国太阳能光伏利用还处在初级阶段，电池成本较高，尚未突破汽车应用的关键技术。

按太阳总辐射量空间分布，可分为最丰富区、很丰富区、丰富区和一般地带 4 类地区。我国属于上述一、二、三类地区的国土面积占国土总面积 96% 以上，太阳能资源总量可达 1.7 万亿 t 标准煤，发电可利用量达 22 亿 kW，预计成本 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 为 2.6~4.1 元。图 1-2-9 所示为一款新概念太阳能汽车。



图 1-2-9 太阳能汽车

太阳能汽车主要由太阳能电池组、自动阳光跟踪系统、驱动系统、控制器和机械系统等组成。

(1) 太阳能电池组

太阳能电池组是太阳能汽车的核心，由一定数量的单体电池串联或并联组成电池方阵。太阳能单体电池由半导体材料制成，当太阳光照射在半导体材料上时，半导体的电子-空穴



对被激发,形成势垒,即 P-N 结。由于势垒的存在,在 P 型层产生的电子向 N 型层移动而带正电,在 N 型层产生的空穴向 P 型层移动而带负电,于是在半导体元件的两端产生 P 型层为正的电压,即形成了太阳能电池。

太阳能电池的电流强度与太阳光照射强度和太阳能电池面积成正比。车用太阳能电池将很多太阳能电池排列组合成太阳能电池板,以产生所需要的大电流和高电压。

(2) 向日自动跟踪器

太阳能电池能量的多少取决于太阳能电池板接收太阳辐射能量的多少,由于相对位置的不断变化,太阳能电池板接收的太阳辐射能量也在不断变化。向日跟踪器的作用就是保持太阳能电池板正对着太阳,最大限度地提高太阳能电池板接收太阳辐射能的能力。

(3) 控制器

控制器主要对太阳能电池组进行管理并对电动机进行控制,其作用与纯电动汽车控制系统相同。

(4) 驱动系统

太阳能汽车采用的驱动电动机主要有交流异步电动机、永磁电动机、直流电动机等,其驱动系统与纯电动汽车基本相同。

(5) 机械系统

机械系统主要包括车身系统、底盘系统和操纵系统等。车身系统应满足汽车的安全和外形尺寸要求。一般来说,太阳能汽车的外形设计要使行驶过程中的风阻尽量小,同时又要使太阳能电池板的面积尽量大。太阳能汽车要求底盘的强度和安全性达到最大,而且重量尽量轻。

太阳能汽车由太阳能电池板在向日自动跟踪器的控制下始终正对太阳,接收太阳光,并将其转换成电能,向电动机供电,再由电动机驱动汽车行驶,它实际上是一种电动汽车。

太阳能电池的能量较低,而且受天气的影响,在阴天、下雨时,其转换效率会降低,因此太阳能电池往往与蓄电池组共同组成太阳能混合动力系统。当光照强烈,电能充足时,由太阳能电池板将太阳能转换为电能后,通过充电器向蓄电池组充电,也可由太阳能电池板直接提供电能,通过电流变换器将电流输送到驱动电动机,驱动汽车行驶,其驱动模式相当于串联式混合动力汽车(SHEV)。一般采用智能控制系统来控制其运行。当光照较弱或阴天时,则靠蓄电池组对外供电。

太阳能汽车的特点如下:

- 1) 节约能源。太阳的能量取之不尽、用之不竭,节能效果显著。
- 2) 能源利用率高。太阳能汽车很少通过齿轮机构传递能量,可防止能量损耗,同时驱动电动机的能量利用率又非常高(可达98%),远高于内燃机汽车(一般为30%左右)。
- 3) 减少环境污染。太阳能汽车不产生废气。
- 4) 灵活、操控性好。与传统汽车不同,太阳能汽车由电池板、储电器和电动机组成,只要控制流入电动机的电流就可解决控制问题,全车主要有3个技术环节:将太阳光转化为电能、将电能储存起来、将电能最大程度地应用到动力上。

太阳能汽车代表了汽车发展的新水平,因此被人们称为“未来汽车”。但是,由于造价昂贵、动力受太阳照射时间限制及承载能力差等特点而无法普及。据有关专家推测,太阳能汽车走入现实生活,至少还需要30~50年时间。



1.2.1.8 空气动力汽车

空气动力汽车以空气作为能量载体，使用空气压缩机将空气压缩到 30MPa 以上，然后储存在储气罐中。需要起动汽车时，将压缩空气释放出来驱动气动马达。2002 年在巴黎举行的国际汽车展上，展出了世界第一款使用高压空气驱动发动机的小型汽车 cityCAT（图 1-2-10）。空气动力汽车的主要部件包括储气罐、倍增器、气体发生器、气动马达、单向阀、安全阀（附温度传感器和压力传感器）、分压阀和控制仪表等。

2010 年，法国 MDI 公司在日内瓦国际车展上展示了一辆空气动力汽车 Airpod（图 1-2-11），这是一款只能在城市行驶的汽车，采用压缩空气驱动，行驶过程完全实现零排放、零污染。车速低于 35mile/h（1mile = 1.61km）时，这种空气动力汽车完全依赖气罐工作，只排放出冷空气。车速增高时，一个小型常规燃料发动机会开始工作，加热气罐内的空气，使其加速释放，从而获得更高的速度。该车的续驶里程能达到 20mile（32.19km），发动机起动后能再行驶数百英里，最高车速达 96mile/h。



图 1-2-10 cityCAT 空气动力汽车



图 1-2-11 Airpod 空气动力汽车

2011 年，零排放汽车公司（ZPM）将空气动力汽车投放美国市场，这种汽车通过压缩空气和一个小型常规发动机驱动，单车售价 1.8 万 ~ 2 万美元，燃料效能达到 100km/gal（1gal = 3.79L），在低速行驶时可实现零排放。

空气动力汽车的优点是排放少、维护少，缺点是需要电源，空气压力（能量输出）随行驶里程增长而衰减，高压气体存在安全隐患。部分人认为，由于压缩空气本身就是高耗能，而空气压缩机本身是转换电能效率最低的机器之一，不如直接使用电能。因此，从能源利用角度看，空气动力汽车的产业化意义不大。

1.2.2 国内新能源汽车发展现状

我国新能源汽车的发展是政府主导推动、市场驱动优化，政府提供 863 计划等科研项目，由科研机构和企业承担，初步形成了一个以政府、企业、研究机构、大学等共同参与的技术研发系统。日本、美国和欧洲的经验表明，建立政府、企业和研究机构（包括大学和研究所）等共同参与的技术研发体系，可赋予新能源汽车技术创新和产业发展以较高的效率。

近年来，我国自主研发的纯电动、混合动力和燃料电池三类新能源汽车整车产品相继问世，混合动力和纯电动客车实现了规模示范，纯电动汽车实现批量出口，燃料电池汽车研发进入世界先进行列。我国新能源汽车技术研发取得重大进展，基本掌握了电动汽车的核心技术，建立了具有自主知识产权的新能源汽车技术平台，构成了比较完整的关键零部件体系，



部分汽车企业相继开发出具有自主知识产权的新能源汽车产品，实现了整车小批量生产能力和局部的商业化示范运行能力。

在国家密集出台扶持政策的基础上，我国新能源汽车呈现出加速发展的态势。国产新能源汽车如雨后春笋般涌现，如长安 CV9 混合动力汽车（图 1-2-12）、杰勋混合动力汽车、奇瑞 A5 混合动力汽车、东方之子燃料电池汽车（图 1-2-13）、海马 H12 电动汽车、华普海域甲醇动力汽车（图 1-2-14）、吉利海尚混合动力汽车（图 1-2-15）等。



图 1-2-12 CV9 混合动力汽车



图 1-2-13 东方之子燃料电池汽车



图 1-2-14 华普海域甲醇汽车



图 1-2-15 海尚混合动力汽车

截至目前，我国新能源汽车试验示范已有十余年的历史，积累了很多有用的数据，同时也为产业化发展积累了经验。由于关键零部件核心技术仍需突破，新能源汽车产业化仍然面临诸多障碍。在新能源汽车领域，培育自主开发能力和创建自主品牌的难度相对于传统汽车领域要低很多。如果我国汽车产业能抓住新能源汽车的发展机遇，在产业化发展上实现突破，则完全有可能实现汽车产业的跨越式发展，提高我国汽车产业的整体竞争力。

我国主要汽车企业的新能源汽车产品及技术能力见表 1-2-1。

表 1-2-1 我国主要汽车企业的新能源汽车产品及技术能力

汽车企业	技术路线	技术能力	主要产品
比亚迪	EV、PHEV、HEV	具备电池单体、总成生产能力，电池技术、生产能力强	F3DM、E6、唐、宋、秦、元
上汽	HEV、EV、FCEV	具备整车控制、电动机控制及变速器控制能力	荣威 950、荣威 750、荣威 ERX5、荣威 550 混动、荣威 E50
一汽	HEV、PHEV、EV	具备混动、纯电动汽车开发能力	091FEV、奔腾 B70HEV、奔腾 FCV、奔腾 B50EV



(续)

汽车企业	技术路线	技术能力	主要产品
奇瑞	HEV、EV	控制系统开发能力	瑞麒 G3、X1-EV、M1-REEV
长安	HEV、EV	中度混合动力、纯电动的研发技术	杰勋、志翔、CX30、E30
广汽	HEV、PHEV	整车控制器、电动机控制器开发能力	传祺 PHEV
江淮	EV、PHEV	电控、电池、电动机及“六小电”设计能力	iEV1-3
华晨	EV	电动机、控制器、电池单体与供应商合作，具备电动车整车开发、生产、测试，电池成组化生产、动力系统平台生产能力	H230、H530
北汽	EV、HEV	整车控制器、电池和电动机控制器开发能力	E150EV

2016 年底，国务院印发《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，提出发展新能源汽车（尤其是动力电池、燃料电池）、汽车轻量化、智能驾驶等领域。本次十三五规划是在十二五的宏观大目标下的细化和延伸。其中，汽车产业方面主要对新能源汽车做了更加细致的规划，同时涉及到智能驾驶、轻量化等技术领域。新能源汽车规划主要做了三方面工作：①十二五规划已有领域做重点突出；②十二五规划中未涉及内容的补充；③各细分领域 2020 年的目标。其中，燃料电池汽车与电动汽车、动力电池并列，提及力度加大。新能源积分作为新增项目首度在十三五规划中被提及。同时，十三五规划对新能源汽车的各细分领域做出了 2020 年的阶段目标规划。其中，计划到 2020 年新能源汽车产销 200 万辆以上，相较于 2015 年 33 万辆的产销量，年均复合增长率达 43%。燃料电池汽车计划到 2020 年实现批量生产。动力电池计划到 2020 年技术水平与国际同步，与工信部发布的《汽车动力电池行业规范条件》中“锂离子动力电池单体企业年产能力不低于 80 亿 W·h，系统企业年产能力不低于 80000 套或 40 亿 W·h”形成组合拳，在准入门槛提高的背景下，动力电池行业资源或将向龙头企业靠拢。

“十三五”新兴产业规划提出，在新能源汽车领域，将从六个方面重点发力：

- ① 实现新能源汽车规模应用。
- ② 全面提升电动汽车整车品质与性能。
- ③ 建设具有全球竞争力的动力电池产业链。
- ④ 完善动力电池研发体系，加快动力电池创新中心建设，突破高安全性、长寿命、高能量密度锂电池等技术瓶颈。
- ⑤ 系统推进燃料电池汽车研发与产业化。
- ⑥ 加速构建规范便捷的基础设施体系。

1.2.3 汽车行业节能减排技术研究现状

1.2.3.1 替代能源与提效节油减排技术

在第 17 届世界石油大会上，欧盟提出了常规汽、柴油燃料与替代燃料排放温室气体



CO₂ 的比较,见表 1-2-2。甲醇和二甲醚是开发中的清洁燃料,甲醇相对分子质量为 32,含氧量为 50%,所要求的空燃比低,只有 6.4 (汽油为 14.8),其空燃混合气的热值与汽油的热值很接近 (2656/2786)。二甲醚相对分子质量为 46,含氧量为 35%,空燃比为 9,其空燃混合气的热值比柴油的热值高 (3067/2911)。甲醇的辛烷值高达 110 左右,抗爆性好,二甲醚的十六烷值为 60 (比一般柴油高很多),这都能提高发动机的动力性能,降低排放和能耗。甲醇和二甲醚燃料的性质和燃烧性能也决定了它们比汽、柴油燃料更加清洁,排放指标优于汽、柴油。各种汽车燃料的常规和非常规排放量比较见表 1-2-3 和表 1-2-4。

由表 1-2-4 可知,在无净化器情况下,二甲醚燃料的常规排放量基本可达欧Ⅲ标准,甲醇基本可达欧Ⅱ标准。而汽油中少量残留硫化物对尾气催化器有毒化作用,使催化剂寿命缩短。国际能源机构、美国甲醇研究院等对各种汽车燃料非常规排放 (苯、二丁烯、甲醛等) 的测试表明,二甲醚燃料的非常规排放量甚微,接近于氢;甲醇燃料排放中没有致癌度高的苯,总致癌度低。甲醇燃料的非常规排放物中会有微量未燃烧完全的甲醇存在,这是其他燃料所没有的,但其含量不会造成污染危害,甲醛的排放量低于柴油而高于汽油。由于甲醇燃料尾气排放物中 NO_x 含量已很低,催化器可暂不用三元催化剂,铂用量可大大减少。

由此可见,即便使用甲醇掺烧汽油,也与已推行的乙醇汽油一样,可大大改善汽车的尾气排放,能起到一定的改善排放指标的作用。二甲醚燃料替代柴油在清洁燃料方面所起到的作用就更加明显。

表 1-2-2 常规燃料与替代燃料发动机技术的 CO₂ 排放比较

能 源	来 源	发动机	CO ₂ /[g/(kW·h)]	车辆效率	CO ₂ /(g/km)	CO ₂ 相对值/(g/km)
柴油	石油	柴油机	308	0.54	166	1.00
柴油	石油	Hy-DI	308	0.46	142	0.85
FT 柴油	天然气	柴油机	376	0.54	203	1.22
二甲醚	天然气	柴油机	318	0.54	172	1.03
生物柴油	植物油	柴油机	201 (209)*	0.54	108	0.60
汽油	石油	SI	327	0.66	216	1.30
汽油	石油	Hy-SI	327	0.53	173	1.04
ETBE	甜菜, 石油	SI	278 (130)*	0.66	183	1.10
乙醇	生物质	SI	169 (361)*	0.66	111	0.70
天然气	天然气	SI	224	0.66	148	0.89
LPG	石油和天然气	SI	276	0.66	182	1.10
压缩氢	电解, 核能	FC	130	0.4	52	0.31
压缩氢	天然气 + 电力	FC	388	0.4	155	0.93
液化氢	天然气 + 电力	FC	627	0.4	251	1.51
电力	多种	EPT	472	0.2	94	0.57

注: 1. FT 柴油为费托法合成柴油, ETBE 为乙基叔丁基醚, SI 为点燃式发动机, FC 为燃料电池, Hy-DI 为柴油-电力混合车, Hy-SI 为汽油-电力混合车, EPT 为电力火车。() * 指来自生物质能源。

2. 混合动力汽车采用由电池组、电动机和汽油发动机等部件组成的混合动力系统, 车辆在起动、加速或爬坡时, 汽油发动机与电动机同时工作; 车辆处在低速、滑行或怠速状态时, 则由电池组驱动电动机, 而发动机则向电池组充电。这种汽车可节省汽油 20%~40%。



表 1-2-3 各种汽车燃料常规排放量比较

(单位: g/km)

项 目	氢	二甲醚	甲醇 M100	天然气	石油气	柴 油	汽 油
欧洲标准	微	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	
CO	0	0.12	0.93	1.07	0.46	0.40	12.6
HC	0	0.04	0.06	0.14	0.61	0.14	10.46
NO _x	0.037	0.20	0.15	0.21	0.19	0.94	3.35

注: 数据来源为国际能源机构 (IEA) 等。

表 1-2-4 各种汽车燃料非常规排放量比较

(单位: g/km)

项 目	氢	二甲醚	甲醇 M100	天然气	石油气	柴 油	汽 油	
							有净化器	无净化器
苯	0	0	0	0.6	<0.5	1.5	4.7	55
二丁烯	0	0	<0.5	<0.5	<0.5	1.0	0.6	1.8
甲醛	0	0	5.8	<2.0	<2.0	12	2.5	4.3
甲醇	0	0	7.9	0	0	0	0	0

注: 数据来源为国际能源机构 (IEA) 等。

替代能源与常规能源的相对价格估算比较见表 1-2-5。在欧盟, 汽油、柴油税收为最终价格的 70% 以上, 汽油平均每升税收大于 0.7 欧元, 柴油大于 0.4 欧元。替代能源成本尚比常规汽、柴油高出许多, 汽、柴油分销费用为 0.08 欧元, 而 30MPa 的压缩氢为 0.72 欧元。但一些替代燃料, 如液化石油气 (LPG)、压缩天然气 (CNG)、生物柴油等已走上市场, 并享受减税优惠政策。通过比较可见, 柴油、液化天然气、乙醇和生物柴油具有较低的 CO₂ 排放性和较好的经济性。

表 1-2-5 替代能源与常规能源的相对价格比较

能 源	发动机	生 产 成 本		分 销 成 本	税 前 能 源 成 本	
		最低	最高	平均	最低	最高
欧洲柴油	柴油	平均	0.16	0.08	平均	0.24
欧洲汽油	SI	平均	0.19	0.08	平均	0.27
FT 柴油	柴油	0.28	0.42	0.10	0.38	0.52
LPG	SI	0.17	0.25	0.20	0.37	0.45
天然气	SI	0.10	0.18		0.25	0.50
生物柴油	柴油	0.39	0.57	0.10	0.49	0.67
巴西乙醇	SI	0.36	0.49	0.15	0.51	0.64
法国乙醇	SI	0.65	0.85	0.15	0.80	1.00
二甲醚	柴油	0.20	0.33	0.20	0.40	0.53
压缩氢	FC	0.26	0.36	0.72	0.98	1.08
压缩氢 (电解制氢)	FC	0.84	1.12	0.72	1.56	1.84

注: 以欧盟每升柴油当量 (10kW·h) 为基准。



据欧盟规划,到2020年,欧盟替代燃料的普及替代率将达到23%,见表1-2-6。虽然生物燃料的成本目前是常规燃料的2~3倍,氢气更高,但从发展前途看,替代燃料的生产成本会因技术的进步而逐渐降低,因环保要求的严格而扩大应用范围,这是世界车用燃料发展的总趋势。欧盟将考虑把生物燃料、天然气和氢燃料电池作为首选的替代燃料。

表 1-2-6 欧盟替代燃料的普及替代率预测

项 目	2000 年	2005 年	2010 年	2020 年
汽油/(百万 t/a)	132	142	144	150
柴油/(百万 t/a)	140	155	170	175
基于石油的燃料/(百万 t/a)	272	297	314	325
乙醇/(百万 t/a)	0.2			
生物柴油/(百万 t/a)	0.5			
生物燃料 (%)		(2)	(6)	(8)
天然气 (%)			(2)	(10)
氢气 (%)				(5)
总替代率 (%)	(0)	(2)	(8)	(23)

为解决长期的燃料供应问题,开发利用生物燃料是切实可行的解决方案。纯的及调和的生物燃料产品已开始大量进入市场。生物燃料包括生物乙醇、生物柴油、ETBE、生物甲醇和生物二甲醚。

现代汽车从新结构的研制、新技术的应用、新材料的选择、新能源的开发利用等方面入手,在节能方面取得了卓有成效的进展。提高汽车的驱动效率是节油减排的主要途径。

(1) 汽车轻量化设计

一般车重减轻10%,可节油8%,效果明显。具体措施除从设计结构上改进外,还包括以塑料、铝合金等轻型材料代替钢铁材料。

(2) 陶瓷发动机

采用陶瓷中具有金属韧性且高温强度高的氮化硅、碳化硅和部分稳定性氧化锆(PSA)等精细陶瓷制成的发动机,不仅重量比金属发动机轻,还有活塞惯性和摩擦阻力小,缸体不需冷却等诸多优点,可使燃烧效率提高到50%,节油率可达20%~30%。目前陶瓷发动机实用化的主要障碍是陶瓷的脆性和由此导致的低可靠性。

(3) 稀薄燃烧法

通过高压压缩比送入过量空气,不仅可使燃料充分燃烧,且在高压下不易发生爆燃,轴端效率可达40%,已接近柴油机水平,节油效果明显,各国都在采用。不足之处是 NO_x 排放量因空燃比的加大而增多,普通的三元催化剂难以治理。据此,马自达、日产和丰田等公司都开发出适应稀薄燃烧的特殊三元催化剂,使 NO_x 的还原率由原来的5%提高到50%、80%和90%,从而保证 NO_x 大幅下降,为稀薄燃烧的推广创造了条件。

(4) 直喷燃烧法

首先用于汽油机,可节油25%~35%,其节油因素为:

① 空燃比高达50,而汽油机在三元催化剂作用下的理论空燃比仅为14.7,采用稀薄燃



烧后提高到 22，空燃比的加大有利于完全燃烧。

② 直喷发动机将空气和燃油直接喷入气缸内混合燃烧，在点火处混合气较浓有利点火，此后浓度逐步下降，形成超稀薄燃烧，并可分段控制空燃比。

③ 大量送入空气时进气门的开度加大，减小了通气阻力，也有利节能。

(5) 过量给风机的高性能化

可向发动机过量送入空气，可提高发动机动力性能并改善运行性能，有利于降低油耗和减少 CO_2 排放。

1.2.3.2 新能源汽车与再生制动设计

(1) 制动能量回收对于新能源汽车的重要意义

有关研究表明，在存在较频繁的制动与起动的城市工况运行条件下，有效地回收制动能量，可使电动汽车的行驶里程延长 10%~30%。制动能量回收要综合考虑车辆动力学特性、电机发电特性、超级电容与蓄电池充放电安全性、可靠性等多方面问题。

电动汽车和混合动力汽车最重要的特性之一是其显著回收制动能量的能力。在电动汽车和混合动力汽车中，电机可被控制作为发电机运行，从而将车辆的动能或重力势能转化为电能并储存在超级电容、蓄电池或飞轮等能量存储装置中，使能量得以再次利用。制动能量的回收对于频繁起停的城市公交车同样具有深远意义。

一般而言，当电动汽车或混合动力汽车减速、在公路上放松加速踏板巡航（有相关的算法判断）或踩下制动踏板停车时，再生制动系统启动。正常减速时，再生制动的力矩通常保持在最大负荷状态；电动汽车或混合动力汽车高速巡航时，其电机一般是在恒功率状态下运行，驱动转矩与驱动电机的转速或车速成反比。由此可见，研究电动汽车的制动模式也是非常重要的，电动汽车制动可分为以下三种模式：

1) 紧急制动。紧急制动对应于制动加速度大于 2m/s^2 的过程。出于安全性方面的考虑，紧急制动应以机械为主，电制动同时作用。在紧急制动时，可根据初始速度的不同，由车上 ABS 控制提供相应的机械制动力。

2) 中轻度制动。中轻度制动对应于汽车在正常工况下的制动过程，可分为减速过程与停止过程。电制动负责减速过程，停止过程由机械制动完成。两种制动的切换点由电机发电特性确定。

3) 汽车下长坡时的制动。汽车下长坡一般发生在盘山公路下缓坡时。在制动力要求不大时，可完全由电制动提供。其充电特点表现为回馈电流较小但充电时间较长。限制因素主要为蓄电池的最大可充电时间。

制动能量回收系统工作在城市工况下有较大意义，而城市工况车辆的最高车速不会太高，且紧急制动的概率较小，因此应将研究重点放在中轻度制动能量回收方向上。

一般地，恒功率下驱动电机的转速越高，再生制动的能力就越低。当踩下制动踏板时，驱动电机通常运行在低速状态。由于在低速时，电动汽车的动能不足以驱动电机提供能量来产生最大的制动力矩，再生制动能力也会随车速的降低而减小。

图 1-2-16 所示为电机再生制动和机械摩擦制动系统复合的制动系统，电机的再生制动力矩通常不能像传统燃油车中的制动系统一样提供足够的制动减速度。因此在电动汽车中，再生制动和机械摩擦制动通常共同存在（一般当再生制动达到最大制动能力但还不能满足制动要求时，机械摩擦制动才启动）。



在典型的市区中,制动能量最高可达总驱动能量的 25% 以上。在如纽约这样的大城市中,制动能量最高可达 70%。研究表明,将 1500kg 车辆从 100km/h 车速制动到零车速,在几十米距离内约消耗 0.16kW·h 的能量。如果能量消耗在仅克服阻力(滚动阻力和空气阻力)而没有制动的惯性滑行中,则该车将行驶约 2km。可见,当车辆在市区内以停车-起动形式行驶时,显著的能量消耗在频繁的制动上,导致大量的燃油消耗。因此,有效的再生制动能显著改善电动汽车和混合动力汽车的经济性。

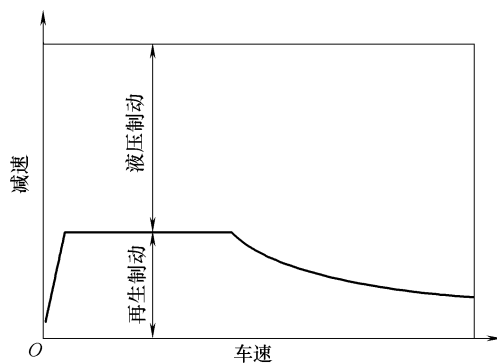


图 1-2-16 再生制动和机械摩擦制动

(2) 制动能量回收系统的设计因素

设计制动能量回收系统时,应充分考虑以下设计因素:

- 1) 满足制动的安全要求,符合驾驶人的制动习惯。
- 2) 考虑驱动电机的发电工作特性和输出能力。
- 3) 确保蓄电池组的安全性与可靠性。

由以上分析可得制动能量回收的约束条件:

- 1) 根据蓄电池组温度、放电深度的不同,蓄电池可接受的最大充电电流。
- 2) 蓄电池可接受的最大充电时间、温度,防止过充或失效。
- 3) 能量回收停止时电机的转速及与此相对应的充电电流值。

以上问题也是限制内燃机汽车应用电制动回收制动能量的一个难点。

因此,研究电制动的制动能量回收系统,要充分了解蓄电池和电机的特性,如果采用液压或飞轮来吸收存储制动能量,则也需要掌握其特性。

(3) 新能源汽车的典型制动系统

1) 串联制动。具有最佳制动感觉的串联制动系统由可控制的前后轮上施加制动力的制动控制器组成,其控制目标在于使制动距离趋于最小值,并优化驾驶人的感受。最短的制动距离和良好的制动感受要求施加在前后轮上的制动力遵循理想的制动力分布曲线。

施加于前轮(驱动轴)上的制动力可分为再生制动力和机械摩擦制动力两部分。当所需制动力小于电机所能产生的最大制动力时,将只应用电再生制动。当给出的制动力指令大于可应用的再生制动力时,电机将产生最大制动转矩。同时,剩余制动力将由机械摩擦制动系统满足。

2) 宝马制动能量回收技术。宝马汽车的制动能量回收系统通过在制动、滑行或减速时给蓄电池充电,改善燃油效率最多达 3%,并确保发动机加速时拥有完全功率。

3) 防抱死制动系统(ABS)。电机制动力(制动转矩)的有效控制相较机械制动力控制更容易。因此,对于电动汽车和混合动力汽车,在配置有电制动装置的制动过程中,防抱死是其固有优点,尤其是对于在 4 个车轮上安置有电机的车辆。图 1-2-17 为典型防抱死制动系统的再生制动系统示意。

该制动系统的主要组件是制动踏板、主缸、电控制动装置、电控三端口开关(通常模



式：端口1开，端口2关，端口3开)、流体蓄能器、压力传感器和总控制器单元。压力传感器检测流体压力，它表征了驾驶人所期望的制动强度。流体通过电控三端口开关释放至流体蓄能器。由此仿效了传统制动系统的制动感受。

接收到制动压力信号后，总控制器单元根据驱动电机特性和控制法则，给出前后轮的制动转矩、再生制动转矩和机械制动转矩。电机控制器（图1-2-17）将指令电机产生恰当的制动转矩，而机械制动控制器则向电动制动装置发出指令，以对每个车轮产生恰当的制动转矩。

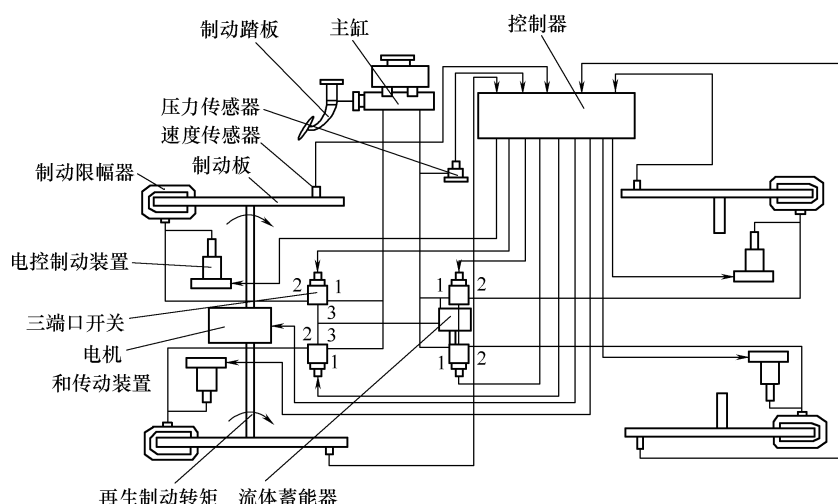


图 1-2-17 典型防抱死制动系统的再生制动系统示意图

该电动制动装置同时发挥防抱死制动系统的功能，以防止车轮完全抱死。若检测出某个电动制动装置失效，则相应的三端口开关将关闭端口3，开启端口2，使流体直接释放至车轮缸，产生制动转矩。控制策略对能量回收和制动性能是有决定性意义的。

1.2.3.3 新能源汽车驱动电动机的种类与技术特点

(1) 新能源汽车驱动电动机的种类与特征

用于新能源汽车的各种驱动电动机与普通工业用电动机有较大区别，通常要求能够频繁起停、加减速，在低速或爬坡时要求高转矩，高速行驶时要求低转矩，并要求变速范围大。

新能源汽车驱动电动机在负载要求、技术性能及工作环境等方面的主要特征包括：

- 1) 新能源汽车驱动电动机通常需要有4~5倍的过载，以满足短时加速行驶与最大爬坡度时对驱动功率的需求。
- 2) 新能源汽车驱动电动机的最高转速要求达到基速的4~5倍。
- 3) 新能源汽车驱动电动机要求有高比功率和优良的工作效率，能降低车辆自重并延长续驶里程。
- 4) 当有多电动机协同工作时，要求新能源汽车驱动电动机可控性高、稳态精度高、动态性能好。
- 5) 新能源汽车驱动电动机受限于汽车的容积效率，工作在高温、恶劣天气及较强振动等条件下。

目前，混合动力汽车常用的驱动系统有4种：直流电动机、异步电动机、永磁电动机、



开关磁阻电动机。其中,永磁同步电动机具有高效、高控制精度、高转矩、密度低等特点,通过合理设计磁路结构能获得较高的弱磁性能,在电动汽车特别是高档电动汽车驱动方面具有很高的应用价值,已经受到国内外电动汽车界的高度重视。

1) 直流电动机。较早开发的电动汽车上多采用直流电动机,现在仍有一些电动汽车采用直流电动机驱动。

① 直流电动机结构。直流电动机由转子电枢绕组、定子励磁绕组、机座和电刷换向装置等部件组成。串励式直流电动机的电枢绕组和励磁绕组串联,而他励式直流电动机的励磁绕组和电枢绕组是分开的。

② 直流电动机特点。早期的直流电动机通过电阻降压调速,这要消耗大量能量。目前多数采用直流斩波器来控制输入电压、电流,根据直流电动机输出转矩的需要,脉冲输出和变换直流电动机需要从零到最高电压,来控制驱动直流电动机运转。直流电动机的容量范围大,可根据需要选用。其制造技术和控制技术都较成熟,驱动系统也较简单,价格便宜。但直流电动机在结构上有电刷、换向器等易磨损件,因此存在维修保养困难、寿命较短、使用环境要求高、结构复杂、效率低、质量大及体积大、耗材多等缺点。目前新研制的电动汽车已很少采用直流电动机。

2) 笼型交流异步电动机。三相笼型交流异步电动机是目前应用最广泛的电动机,转子无需电刷,结构简单,其生产技术比较成熟,已经能够大批量生产。

① 笼型交流异步电动机结构。三相笼型交流异步电动机由定子和转子两部分组成。定子由机座和三相定子绕组组成,接电源。转子由硅钢片组成,内有呈笼形的互相短路的导条。

② 笼型交流异步电动机工作原理。在异步电动机的定子绕组上施加三相交流电时,电动机中会产生旋转磁场,该磁场的转速由定子电压的频率及电动机极数决定。磁场旋转时,位于该磁场中的转子导条会切割磁力线,并在转子导条中产生相应的感应电流,而此感应电流又受到旋转磁场的作用而产生电磁力,使转子跟随旋转磁场旋转,输出动能。

③ 笼型交流异步电动机控制。在电动汽车上,交流异步电动机不能直接使用蓄电池或发电机发出的电能(因为频率一定)。交流异步电动机的转速与所供交流电的频率近似成正比,因此在采用交流异步电动机时,需应用变频器,将直流电或发电机发出的固定频率的交流电转换成频率和电压均可调的三相交流电,实现对笼型交流异步电动机的控制。

④ 笼型交流异步电动机特点。虽然三相笼型交流异步电动机具有结构简单、坚固耐用、工作可靠、维护方便、价格便宜等优点,得到了广泛应用,但仍存在技术上的难点。如变频器所产生的高次谐波、高附加铜耗及铁耗、高绝缘介质损耗、附加脉动转矩、电磁噪声等。

3) 永磁无刷直流电动机

① 永磁无刷直流电动机结构。永磁无刷直流电动机主要由电动机本体、位置传感器和电子开关线路三部分组成。其定子绕组一般制成多相(三相、四相、五相)。转子由永久磁铁按一定极对数组成。

② 永磁无刷直流电动机工作原理。永磁无刷直流电动机运行过程中,通过控制各相绕组通电频率及电流大小来调节转速及转矩,控制定子绕组的通电次序使电动机正反转,这些都可以通过微电子系统来实现。

③ 永磁无刷直流电动机特点。永磁无刷直流电动机工作时,直接将近似方波的电流输



入其定子绕组中,可使电动机获得较大转矩,效率高、出力大、无电刷、高速性能好、结构简单牢固、免维护或少维护、质量轻。然而,这种电动机目前还存在损耗多、工作噪声大及脉冲式输出转矩的缺点。

4) 开关磁阻电动机。开关磁阻电动机简称 SR 电动机。它是一种新型电动机,其结构简单、坚固、工作可靠、效率高,其调速系统(SRD)运行性能和经济指标比普通的交流调速系统好,具有很大的潜力,因此近年来它在驱动调速领域的发展颇为迅速。

① 开关磁阻电动机工作原理。SR 电动机的运行遵循磁阻最小原理(磁通总要沿磁阻最小的路径闭合)。具有一定形状的铁心在移动到最小磁阻位置时,必使自己的主轴线与磁场的轴线重合。

② 开关磁阻电动机调速系统组成。开关磁阻电动机调速系统简称 SRD,主要由 SR 电动机、功率变换器、控制器、位置检测器及速度检测器等部分组成。我国稀土永磁材料的储量,这可以降低产业化时电动机系统的整体造价,使研发高性能的永磁电动机系统优势更加明显。

(2) 新能源汽车驱动电动机的技术特点

1) 单电动机或多电动机结构。单个电动机通过变速器和差速器驱动车轮,多电动机结构是每一个驱动轮被单独驱动。单电动机结构的优点:体积小、质量小及成本低。而多电动机结构能减小单电动机的电流和功率的额定值,充分利用车轮内部空间,可均衡电动机尺寸和质量。这两种结构各有优点,因此在现代新能源汽车上都有应用,但是现在单电动机结构的应用占主流。

2) 固定传动比或可变传动比齿轮减速。通常也分为单速传动和多速传动。单速传动采用固定传动比齿轮变速传动,多速传动采用带离合器和变速器的多级齿轮变速传动。对于固定传动比变速传动,要求电动机既能在恒转矩区提供较高的顺势转矩(额定值的 3~5 倍),又能在恒功率区提供较高的运行速度(基速的 3~5 倍)。可变速齿轮传动的优点是应用常规驱动电动机系统可在低档位得到较高的起动转矩,在高档位得到较高的行驶速度,缺点是质量及体积较大、成本高、可靠性低、结构复杂。

3) 系统电压。系统电压等级影响驱动电动机系统的设计。采用合理的高电压电动机可减小逆变器的成本和体积。如果所需电压过高,则需要串联许多蓄电池,这会引起车内及行李箱空间的减小,车辆质量和成本增加,以及车辆性能下降。

4) 系统匹配。电动机与变速器、控制器、变速装置、能源等的匹配是非常重要的。新能源汽车驱动电动机的设计者应充分了解这些部件的特性,然后在给定的条件下设计电动机,应区别于工业驱动电动机的设计。

(3) 新能源汽车驱动电动机的设计要点

基于以上分析,在设计新能源汽车驱动电动机时,需要考虑以下基本元素:

1) 磁载荷。通过电动机气隙的磁通密度基本分量的峰值。

2) 电载荷。电动机单位周长上总电流的均方根或单位周长上的安匝数、单位体积和单位质量的功率和转矩、单位磁路的磁通密度、转速、转矩、功率损失和效率,以及热回路设计和冷却等。相应的关键之处:对钢、磁和铜的较好利用,更好的电磁耦合、电动机的几何形状与布局,更好的热设计与冷却,了解电动机性能的限制,了解电动机的几何形状、尺寸、参数和性能的关系。



1.3 轨道交通行业新能源技术发展现状与趋势

1.3.1 轨道交通行业发展现状

1.3.1.1 国内外轨交行业现状与趋势

(1) 城市轨道交通发展现状与趋势（地铁、轻轨、有轨电车、单轨）

截至2016年，我国已批复规划58个城市线路总投资37018.4亿元，其中14个城市投资计划超1000亿元，48个城市（部分批复未纳入）在建线路总规模5636.5km，未来将有86个城市，超过3万km的城市轨道交通建设规划，目前已运营里程仅4152.8km。磁悬浮、有轨电车、云轨（跨坐式单轨）等多种制式轨道交通协同高速发展。我国未来将有87个城市，规划线路达817条，总计里程超过30556km。按照现阶段城市轨道交通的造价和运营成本计算，将会产生百万亿体量的投资空间。

截至2016年，已有55个国家、200多个城市有地铁运行，地铁线路长度达12865.6km。

(2) 铁路发展现状与趋势（高铁、城际、普铁、货运）

截至2016年，我国高铁已连通28个省、2.2万km。到2020年，运营里程将达3万km，到2025年，完成“十纵八横八连一环”。按照十三五规划，到2020年全国铁路网规模将达到17.4万km，高速铁路网将达到3.8万km。到2030年我国铁路规模将达到20万km左右，其中高速铁路4.5万km左右。

全国铁路网全面连接20万人口以上城市，高速铁路网基本连接省会城市和其他50万人口以上大中城市，实现相邻大中城市间1~4h交通圈，城市群内0.5~2h交通圈。到2030年铁路总体投资额将超过8万亿元。计划到2020年，城际铁路运营里程达到3.6万km（其中新建城际铁路约8000km），覆盖98%的节点城市和近60%的县（市）。

1.3.1.2 我国城市轨道交通发展现状分析

截至2016年末，我国共30个城市开通城市轨道交通运营，共计133条线路，运营线路总长度达4152.8km。其中，地铁3168.7km，占76.3%，其他制式轨道交通运营线路长度984.1km，占23.7%。

年度新增运营线路长度创历史新高，首次超过500km（534.8km），同比增长20.2%。全年累计完成客运量160.9亿人次，同比增长16.6%，拥有两条及以上城轨交通运营线路的城市达到21个。运营线路增多、客流持续增长、系统制式多元化、运营线路网络化的发展趋势更加明显。

2016年，我国城轨交通完成投资3847亿元，在建线路总长5636.5km，均创历史新高。可研批复投资累计34995.4亿元。截至2016年末，共有58个城市的城轨线网规划获批（含地方政府批复的14个），规划线路总长达7305.3km。在建、规划线路规模进一步扩大、投资额持续增长，建设速度稳步提升。

1.3.2 有轨电车新能源技术的技术优势

近年来，快速发展的新能源轨道车辆，如超级电容/动力电池+内燃机混合动力车、超级电容混合动力车、动力电池混合动力车、超级电容+动力电池混合动力车等（部分区段



架设电网,或是全线无网、站点设置充电装置),很好地解决了与汽车共享路权、优化城市交通、维护城市景观的问题,是世界各国大力提倡的新型交通运输方式。它具有以下优点:

1) 美观。无架空接触网造成的视觉缺陷,混合动力技术省去了架空接触网、支撑杆等基础设施,避免破坏城市景观和形象,避免破坏沿街树木和建筑,提高了城市的可观赏性,如图 1-3-1 所示。



图 1-3-1 有无架空接触网景观对比

2) 应用范围广。随着经济环境和城市环境的发展,城市的空间越来越小,而城市人口越来越多,人均占地面积越来越小。混合动力技术适用于部分城市中心广场或街道,既要通行城市有轨电车又不允许设立接触网的区域,如图 1-3-2 所示。

3) 避免杂散电流问题。很多城市存在大量的名胜古迹,而传统的有轨电车需要通过钢轨进行回流,会对周围的基础设施内部的金属产生慢性腐蚀,破坏建筑物等内部构造,而混合动力技术能很好避免此缺陷。

4) 损耗更低。混合动力车辆的供电系统和负载之间无直接电气连接,不会产生火花,不必担心触电和短路,没有机械磨损和摩擦,电气的可靠性和安全性得到了极大提高,设备易维护、易管理。而传统车辆需要安装受电弓或集电靴,需要通过摩擦受流。



图 1-3-2 城市中心无法架设接触网的区域

5) 环境适应性强。传统的架空接触网等基础设施容易受大风、暴雪、暴雨、台风等恶劣天气的影响,而无受电弓电能传输技术不受此类天气的影响,

6) 舒适性好。传统方式需要安装主断路器等高压设备,其频繁动作会产生很大的噪声,而混合动力车辆避免了此类部件的使用,因此噪声水平更低,舒适度更高。

7) 安全性好。混合动力车辆尽量避免使用架空接触网、高压设备,无外界高压接口,电气两端可完全封闭系统,各部分之间可真正实现完全电气绝缘,可确保系统的水密性和气密性,系统更改安全。

8) 智能化高。混合动力车辆无需机械插拔动作,可实现真正的无人化管理,适用于无人区域、环境恶劣区域及一些需要全自动智能工作的场合。

混合动力汽车技术



混合动力汽车是传统内燃机技术与电驱动技术相结合的产物。混合动力汽车的关键技术是混合动力系统，其性能直接关系到混合动力汽车的整车性能。混合动力汽车最突出的优势是燃油经济性好，可以按平均需用的功率确定内燃机的最大功率，使内燃机在油耗低、污染少的最优工况下工作，一般可比传统燃料汽车节约燃油 30%~50%。也可以显著降低排放。同时，蓄电池可以方便地回收制动回馈能量。从普及推广的角度看，混合动力汽车可以利用现有的加油站设施，无须新的投资。

2.1 混合动力汽车的类型与特点

2.1.1 混合动力汽车的定义与分类

(1) 混合动力汽车的定义

从狭义上讲，混合动力汽车指同时装备两种动力源——热动力源（传统的汽油机或柴油机）与电动力源（蓄电池与电动机）的汽车。通过在混合动力汽车上使用电动机，使动力系统可按整车的实际运行工况要求灵活调控，同时使发动机保持在综合性能最佳的区域内工作，以降低油耗与排放。

从广义上讲，混合动力汽车指装备有两种具有不同特点驱动装置的车辆。这两个驱动装置中有一个是车辆的主要动力源，它能提供稳定的动力输出，满足汽车稳定行驶的动力需求，内燃机是目前的首选。另外还有一个辅助驱动装置，它具有良好的变工况特性，能进行功率平衡、能量再生与存储，目前应用最多的是电混合系统。

混合动力汽车一般由发动机、驱动电动机和辅助电源 3 大部分组成。

1) 发动机。发动机是混合动力汽车的主要动力源，可以广泛地采用四冲程内燃机（包括汽油机和柴油机）、二冲程内燃机（包括汽油机和柴油机）、转子发动机、燃气轮机和斯特林发动机等。采用不同的发动机就可以组成不同的混合动力系统。

2) 驱动电动机。驱动电动机是混合动力汽车的辅助动力源。混合动力汽车的驱动电动机可以是交流感应电动机、永磁电动机、开关磁阻电动机、直流电动机和特种电动机等。随着技术发展，直流电动机已经很少采用，多数采用感应电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机。发动机的动力和驱动电动机的“混合”是混合动力汽车动力“混合”的另一种形式。采用不同的电动机可以组成不同的混合动力系统。

3) 辅助电源。混合动力汽车可以装备各种不同的蓄电池和超级电容等作为辅助电源。只有在混合动力汽车起动发动机或电动机辅助驱动时才使用。



(2) 混合动力汽车的分类

混合动力汽车分类方法较多，这里主要介绍6种分类方法，见表2-1-1。

表 2-1-1 混合动力汽车的分类

分类方式	种 类	说 明
按照动力系统结构形式（混合动力汽车零部件的种类、数量和连接关系）划分	串联式混合动力汽车（SHEV）	指车辆行驶系统的驱动力只源于电动机的混合动力汽车。 其结构特点是发动机带动发电机发电，电能通过电动机控制器输送给电动机，由电动机驱动汽车行驶。另外，动力电池也可单独向电动机提供电能驱动汽车行驶
	并联式混合动力汽车（PHEV）	指车辆行驶系统的驱动力由电动机及发动机同时或单独供给的混合动力汽车。 其结构特点是可单独以发动机或电动机作为动力源，也可同时以电动机和发动机作为动力源驱动汽车行驶
	混联式混合动力汽车（PSHEV）	指具备串联式和并联式两种混合动力系统结构的混合动力汽车。 其结构特点是可在串联混合模式下工作，也可在并联混合模式下工作，兼具串联式和并联式的特点
按照混合度划分（按照电动机相对于燃油发动机的功率比）	重度混合（强混合）型混合动力汽车	指以发动机和/或电动机作动力源，且电动机可独立驱动车辆行驶的混合动力汽车。 一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比 $>40\%$
	中度混合型混合动力汽车	指以发动机和/或电动机作动力源的混合动力汽车。一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比为 $15\% \sim 40\%$
	轻度混合（弱混合）型混合动力汽车	指以发动机为主要动力源，电动机作为辅助动力源，在车辆加速和爬坡时，电动机可向车辆行驶系统提供辅助驱动力矩，但不能单独驱动车辆行驶的混合动力汽车。 一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比为 $5\% \sim 15\%$
	微混合型混合动力汽车	指以发动机为主要动力源，不具备纯电动行驶模式的混合动力汽车。 只具备停车怠速停机功能的汽车是一种典型的微混合型混合动力汽车。 一般情况下，电动机的峰值功率和发动机的额定功率比 $\leq 5\%$
按照外接充电能力划分（按照是否能外接充电）	可外接充电型混合动力汽车	一种被设计成可在正常使用情况下从非车载装置中获取能量的混合动力汽车
	不可外接充电型混合动力汽车	一种被设计成在正常使用情况下从车载燃料中获取全部能量的混合动力汽车
按照行驶模式的选择方式划分	有手动选择功能的混合动力汽车	指具备行驶模式手动选择功能的混合动力汽车，车辆可选择的行驶模式包括热机模式、纯电动模式和混合动力模式三种
	无手动选择功能的混合动力汽车	指不具备行驶模式手动选择功能的混合动力汽车，车辆的行驶模式根据不同工况自动切换



(续)

分类方式	种 类	说 明
按照车辆用途划分	混合动力电动乘用车	
	混合动力电动客车	
	混合动力电动货车	
按照与发动机混合的可再充电能量储存系统划分	动力蓄电池式混合动力汽车	
	超级电容式混合动力汽车	
	机电飞轮式混合动力汽车	
	动力蓄电池与超级电容组合式混合动力汽车	

2.1.2 混合动力汽车的特点

混合动力汽车将内燃机、电动机、能量存储装置（蓄电池）等组合在一起，通过参数匹配和优化控制，可充分发挥内燃机汽车和电动汽车的优点，避免各自的不足。混合动力汽车是当今最具实际开发意义的低排放和低油耗汽车。

相较于传统的内燃机汽车，混合动力汽车具有如下优点：

1) 可使内燃机在最佳的工况区域稳定运行，避免或减少了内燃机变工况下的不良运行，使内燃机的排放和油耗大为降低。

2) 在人口密集的商业区、居民区等地可用纯电动方式驱动汽车，实现零排放。

3) 可通过电动机提供动力，因此可配备功率较小的内燃机，并可通过电动机回收汽车减速和制动时的能量，进一步降低汽车的能量消耗和排放。

相较于纯电动汽车，混合动力汽车具有如下优点：

1) 由于有内燃机作辅助动力，蓄电池的数量和质量可减少，因此汽车自重可减小。

2) 由于采用辅助动力驱动，混合动力汽车的续驶里程和动力性可达到内燃机汽车的水平。

3) 借助内燃机的动力，可驱动空调、真空助力器、转向助力器及其他辅助电器，不用消耗蓄电池组有限的电能，从而保证了驾驶和乘坐的舒适性。

表 2-1-2 对不同类型的混合动力汽车在燃油经济性、尾气排放和控制难易程度等方面做了比较。

表 2-1-2 不同类型的混合动力汽车类型的比较

项 目	串 联 式	并 联 式	混 联 式
公路行驶燃油经济性	较优	优	优
城市行驶燃油经济性	优	较优	优
无路行驶燃油经济性	较优	优	优
低排放性能	优	较优	较优
成本	低	较低	较低
复杂程度	简单	较复杂	复杂
控制难易程度	简单	较复杂	复杂



表 2-1-3 对不同类型的混合动力汽车在驱动模式、传动效率、整车布置、适用条件等方面进行了比较。

表 2-1-3 不同类型的混合动力汽车特点的比较

结构模型	串联式	并联式	混联式
动力总成	发动机、发电机、驱动电动机等三大动力总成	发动机、电动/发电机或电动机两大动力总成	发动机、电动/发电机、电动机等三大动力总成
驱动模式	电动机是唯一的驱动装置	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机-电动机混合驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机-电动机混合驱动模式、电机-电动机混合驱动模式
传动效率	能量转换效率较低	传动效率较高	传动效率较高
制动能量回收	能够回收制动能量	能够回收制动能量	能够回收制动能量
整车总布置	三大动力总成之间没有机械式连接装置，结构布置的自由度较大，但三大动力总成的质量、尺寸都较大，一般在大型车辆上采用	发动机驱动系统保持机械式传动系统，发动机与电动机之间由不同的机械装置连接，结构复杂，使布置受到一定限制	三大动力总成之间采用机械装置连接，三大动力总成的质量、尺寸都较小，能够在小型车辆上布置，结构紧凑
适用条件	适用于大型客车或货车，适合在路况较复杂的城市道路和普通公路上行驶，性能更接近纯电动汽车	适用于中小型汽车，适合在城市道路和高速公路上行驶，性能接近普通内燃机汽车	适用于各种类型的汽车，适合在各种道路上行驶，性能更加接近普通内燃机汽车

2.1.3 插电式混合动力汽车

插电式混合动力汽车又称外接充电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid-Electric Vehicle, PHEV）。

PHEV 是在混合动力汽车上增加了纯电动行驶工况，并且加大了动力电池容量，使 PHEV 采用纯电动工况可行驶 50 ~ 90km，超过这一里程，则必须启动内燃机，采用混合驱动模式。PHEV 的动力电池容量一般达 5 ~ 10kW · h，约是纯电动汽车动力电池容量的 30% ~ 50%，是一般混合动力汽车动力电池容量的 3 ~ 5 倍，可以说它是介于混合动力汽车与纯电动汽车之间的一种过渡性产品。

与传统内燃机汽车和一般混合动力汽车（HEV）对比（表 2-1-4），PHEV 更多依赖动力电池驱动汽车，因此其燃油经济性进一步提高，二氧化碳和氮氧化物排放更少。

表 2-1-4 内燃机汽车改为 HEV 和 PHEV 后的性能对比

	HEV	PHEV
燃油经济性提高	21%	56%
二氧化碳排放减少	21%	40%
氮氧化物排放减少	10%	32%



插电式混合动力汽车从结构上可分为串联式、并联式和混联式三种。

串联插电式混合动力汽车结构如图 2-1-1 所示。串联插电式混合动力汽车只依靠电动机驱动行驶，发动机仅作为动力源。典型的串联插电式混合动力汽车，如通用公司研发的雪佛兰沃兰达增程型电动车。

并联插电式混合动力汽车结构如图 2-1-2 所示。该结构承续了中混、强混型油电混合动力汽车的设计思路，由可连接电网的充电器为动力电池充电，通过动力电池向电动机供电作为动力输出的一条路径，另一条路径是由内燃机单独向传动系统传输动力。典型的并联插电式混合动力汽车，如本田雅阁和思域混合动力版等。

混联插电式混合动力汽车结构如图 2-1-3 所示。混联插电式混合动力系统的特点在于电动机驱动系统和内燃机系统各有一套机械变速机构，两套机构或通过齿轮系，或采用行星齿轮式结构接合在一起，从而综合调节内燃机与电动机之间的转速关系。低速时，只靠电动机驱动行驶，速度提高时发动机和电动机配合驱动。与并联系统相比，混联系统可更加灵活地根据工况来调节内燃机的功率输出和电动机的运转，因此结构较为复杂。典型的混联插电式混合动力汽车，如比亚迪的 F3DM 双模电动车。

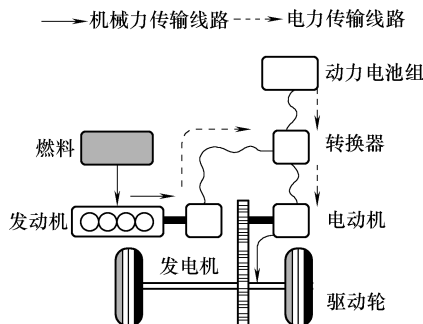


图 2-1-1 串联插电式混合动力汽车结构

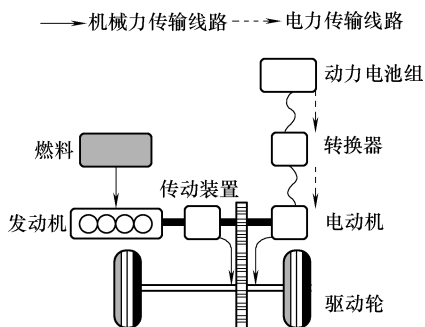


图 2-1-2 并联插电式混合动力汽车结构

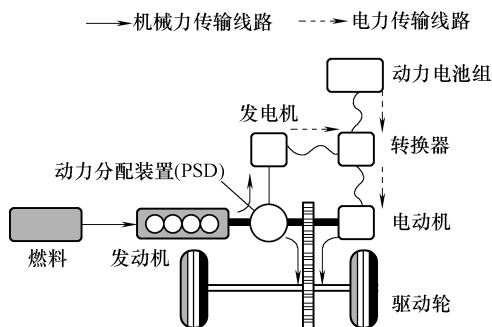


图 2-1-3 混联插电式混合动力汽车结构

2.1.4 混合动力汽车的关键技术

混合动力汽车是集汽车、电力驱动、自动控制、新能源及新材料等技术于一体的高新集成产物，它的研究涉及多个领域，其关键技术主要有动力电池及动力电池管理、电动机、发动机和整车能量管理等。

(1) 动力电池及动力电池管理系统

与纯电动汽车的工作状况不同，混合动力汽车上的动力电池组常处于非周期性的充放电循环。这就要求动力电池必须具有快速充放电和高效充放电的能力，即混合动力汽车所用动力电池在具有高能量密度的同时，更重要的是要具有高功率密度，以便在加速和爬坡时能提供较大的峰值功率。动力电池的性能和寿命与其充放电历史、工作温度等因素密切相关，过



充电和过放电会严重影响动力电池性能，甚至造成动力电池损坏。因此，通过动力电池管理系统对动力电池工作过程和工作环境进行监控，进行准确的剩余电量预测和电量、电压标定，对提高动力电池能效、延长动力电池使用寿命具有非常重要的意义。

(2) 电动机

电动机是混合动力汽车的驱动单元之一，其选用原则为性能稳定、质量轻、尺寸小、转速范围宽、效率高、电磁辐射量小、成本低等。另外，电动机的峰值功率要具有起动发动机能力、电驱动能力、整车加速能力、最大再生制动能力等。目前，混合动力汽车使用的电动机主要有直流永磁电动机、永磁无刷同步电动机、交流异步电动机、开关磁阻电动机等。在交流电动机中，最具代表性的是交流感应电动机，而这种电动机的结构决定了其功率和效率之间的矛盾很难解决，应尽量采用具有高效率、高功率密度、结构紧凑的永磁电动机、开关磁阻电动机等先进电动机。

(3) 发动机

由于混合动力汽车用发动机工作时会频繁起停，为满足排放标准，发动机的设计目标从追求高功率变为追求高效率，并将功率的调峰任务交由电动机承担。

(4) 动力耦合装置

在并联和混联系统中，机械的动力耦合装置是耦合发动机和电动机功率的关键部件，它不仅具有很大的机械复杂性，而且直接影响整车控制策略，因此是混合动力系统开发的重点和难点。目前采用的动力耦合方式有转矩结合式（单轴式和双轴式）、转速结合式和驱动力结合式。

(5) 驱动系统控制

串联式混合动力汽车上，电力驱动是唯一的驱动模式，因此控制系统比较简单。并联、混联混合动力汽车驱动系统中有发动机和电动机两个动力源，两个动力源存在多种配合工作模式，如纯电动、发动机驱动、发动机驱动+电动机辅助、发动机驱动+发电机充电等。根据汽车行驶需要，动力系统在这些工作模式间自动切换。驱动系统的控制策略要能通过实时分析汽车的行驶状况、发动机和电动机的转矩特性及动力电池 SOC 等信息，决定混合动力汽车的工作模式，确定发动机与电动机的合理工况点。即需要对混合动力汽车驱动系统的起步、模式切换、换挡等动态过程进行控制。

整车系统集成关键技术包括：

- 动力系统参数匹配。
- 整车能量控制系统。
- 再生制动系统。
- 车用数据总线。
- 先进车辆控制技术。

关键零部件技术主要包括：

- 混合动力汽车用发动机。
- 驱动电动机及其控制技术。
- 动力电池及其管理系统技术。
- 混合动力汽车用自动变速器技术。

当前混合动力所面临的主要技术问题包括：



- 提高能量存储装置（动力电池）的比功率和寿命。
- 建立更先进、更有效的电子控制和检测系统。
- 电子器件必须减小尺寸、减轻质量。

2.2 混合动力汽车的结构原理

2.2.1 串联式混合动力汽车

串联式混合动力汽车中有两个能源向单个动力机械（电动机）供电。串联式混合动力系统结构如图 2-2-1 所示，主要由发动机、发电机、电动机三大动力总成和蓄电池组等部件组成。

发动机、发电机和驱动电动机采用串联的方式组成驱动系统。发动机仅用于发电，发电机输出的电能通过电动机控制器直接输送到电动机，由电动机产生的电磁力矩驱动汽车行驶。发电机输出的部分电能向蓄电池充电，以延长汽车的行驶里程。发动机的运行独立于车速和道路情况，适合市内常见的频繁起步、加速和低速运行工况。发动机在最佳工况点附近稳定运转，避免了怠速和低速工况，从而提高了效率和排放性能。但是在机械能与电能的转化过程中有能量损失，因此油耗并没有降低。此外，蓄电池还可单独向电动机提供电能以驱动汽车，使混合动力汽车在零污染状态下行驶。

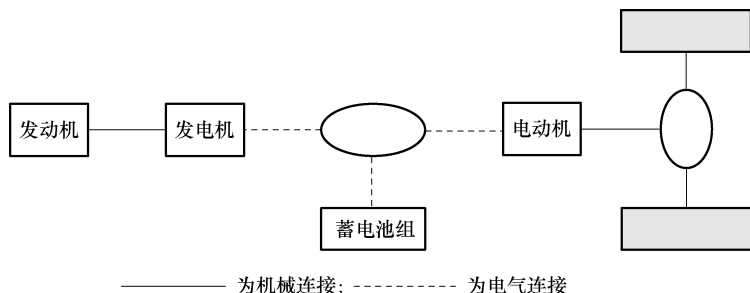


图 2-2-1 串联式混合动力系统结构

在串联式混合动力汽车上，由发动机驱动发电机产生的电能和蓄电池输出的电能，共同输出给电动机以驱动汽车行驶，电力驱动是唯一的驱动模式。

串联式混合动力汽车的动力流程如图 2-2-2 所示。电动机直接与驱动桥相连，发动机与发电机直接连接产生电能，以驱动电动机或给蓄电池充电，汽车行驶时的驱动力由电动机输出，将存储在蓄电池中的电能转化为车轮转动的机械能。

当蓄电池的荷电状态（SOC）降到一个预定值时，发动机开始对蓄电池充电。发动机与驱动系统并没有机械连接，这种方式可在很大程度上减少发动机所受的车辆瞬态响应。瞬态响应的减少可使发动机进行最优的喷油和点火控制，使其在最佳工况点附近工作。

串联式混合动力汽车的发动机能经常保持在稳定、高效、低污染的运转状态，将有害气体控制在最低范围。串联式混合动力汽车的总体结构比较简单，易于控制，只有电动机的电力驱动系统，其性能特点更趋近于纯电动汽车。

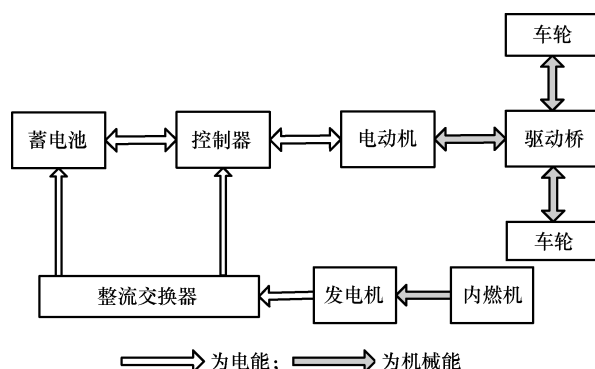


图 2-2-2 串联式混合动力汽车动力流程

发动机、发电机、电动机三大总成在汽车上布置起来有较大的自由度，但各自的功率较大，外形较大，质量也较大，在中小型汽车上布置有一定困难。另外，在发动机—发电机—电动机驱动系统中的热能—电能—机械能的能量转换过程中，能量损失较大。从发动机输出的能量以机械能的形式从曲轴输出，并立即被发电机转变为电能，受发电机的内阻和涡流影响，会产生能量损失（效率为 90%~95%）。电能随后又被电动机转变为机械能，在电动机和控制器中能量又进一步损失，平均效率为 80%~85%。能量转换的效率比内燃机汽车低，串联式混合动力驱动系统适合在大型客车上使用。

串联式混合动力汽车一般有以下运行模式：

- 1) 纯电模式。发动机关闭，车辆仅由蓄电池组供电、驱动。
- 2) 纯电的发动机模式。车辆驱动功率仅源于发动机-发电机组，而蓄电池组既不供电，也不从驱动系统中获取任何功率。电设备组用作从发动机到驱动轮的电传动系统。
- 3) 混合模式。驱动功率由发动机-发电机组和蓄电池组两者提供。
- 4) 发动机驱动和蓄电池组充电模式。发动机-发电机组提供给向蓄电池组充电和驱动车辆所需的功率。
- 5) 再生制动模式。发动机-发电机组关闭，而驱动电动机以发电机模式运转，所产生的电功率用于向蓄电池组充电。
- 6) 蓄电池组充电模式。驱动电动机不接收功率，发动机-发电机组向蓄电池组充电。
- 7) 混合式蓄电池充电模式。发动机-发电机组运行在发电机状态下的驱动电动机，两者都向蓄电池组充电。

串联式混合动力驱动系统的优点如下：

- 1) 发动机与驱动轮脱开连接时，能运行在转速-转矩特性图上的任何运行工作点，且可能完全运行在最大效率区。在这一狭小区域内的优化可使发动机性能获得显著提高。
- 2) 因电动机具有近乎理想的转矩-转速特性，不需要多档的传动设置，因此其结构大为简化，且成本下降。
- 3) 由电传动系统提供的机械上的解耦，可应用简单的控制策略。

串联式混合动力驱动系统的缺点如下：

- 1) 由于发动机的能量被两次转换（在发电机中，由机械能转变为电能，在驱动电动机



中，由电能转变为机械能)，发动机和电动机的低效率相加，损耗显著。

2) 发动机附加了额外的重量和成本。

3) 因为驱动电动机是唯一的驱动车辆的动力机械，所以必须按满足最大运行性能需求定制。

2.2.2 并联式混合动力汽车

并联式混合动力汽车的驱动系统由发动机、电动/发电机或驱动电动机两大动力总成组成。发动机、电动/发电机或驱动电动机采用并联的方式组成驱动系统。

并联式混合动力系统结构如图 2-2-3 所示，它主要由发动机、电动/发电机（以下称电机）和蓄电池等部件组成。并联式混合动力汽车系统有多种组合形式，可以根据使用要求选用。并联式混合动力系统采用发动机和电机两套独立的驱动系统驱动车轮。发动机和电机通常通过不同的离合器来驱动车轮，可以采用发动机单独驱动、电机单独驱动或发动机和电机混合驱动三种工作模式。当发动机提供的功率大于车辆所需驱动功率或车辆制动时，电机工作于发电机状态，给蓄电池充电。发动机和电机的功率可互相叠加，发动机功率和电机功率约为汽车所需最大驱动功率的 0.5 ~ 1 倍。

因此，可采用小功率发动机与电机，使整个动力系统的装配尺寸、质量都较小，造价也更低，续驶里程也可比串联式混合动力汽车长一些，其性能更趋近于内燃机汽车。并联式混合动力驱动系统通常应用在小型混合动力汽车上。

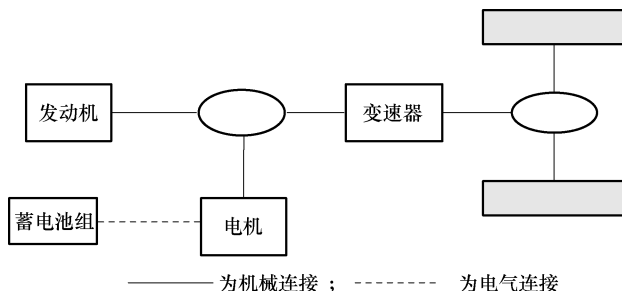


图 2-2-3 并联式混合动力系统结构

并联式驱动系统的动力流程如图 2-2-4 所示。发动机和电机通过某种变速装置同时与驱动桥直接连接。电机可用来平衡发动机所受的载荷，使其能在高效率区工作，因为通常发动机工作在满负荷（中等转速）下燃油经济性最好。在较小的路面载荷下工作时，内燃机汽车的发动机燃油经济性较差，而并联式混合动力汽车的发动机此时可关闭，只用电机来驱动，或增加发动机的负荷使电机作为发电机，给蓄电池充电（即一边驱动汽车，一边充电）。

并联式混合动力汽车在稳定高速行驶状态下，其发动机具有较高的效率，因此它在高速公路上行驶时具有较好的燃油经济性。

并联式驱动系统有两条能量传输路线，可同时使用电机和发动机作为动力源来驱动汽车，这种设计方式可使其以纯电动或低排放状态运行，但是此时不能提供全部动力。

并联式驱动系统的主要部件为动力合成装置，由于动力合成的实现方法具有多样性，相应的动力传动系统结构也多种多样，通常可归类为驱动力合成式、转矩合成式和转速合成式。

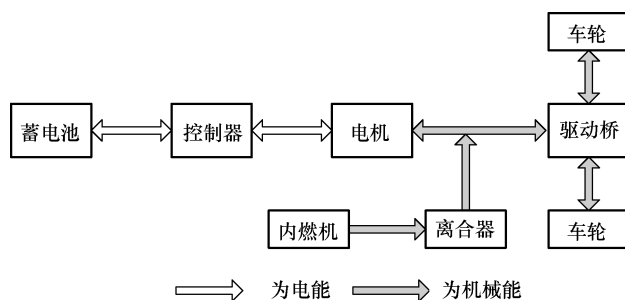


图 2-2-4 并联式混合动力汽车动力流程

(1) 驱动力合成式

驱动力合成式并联混合动力汽车的驱动方式如图 2-2-5a 所示。它采用一个小功率发动机，单独驱动汽车前轮，电机驱动系统则单独驱动汽车后轮，可在汽车起动、爬坡或加速时增加混合动力汽车的驱动力。两套驱动系统可独立驱动汽车，也可联合驱动汽车，使汽车在四轮驱动模式和两轮驱动模式间切换。

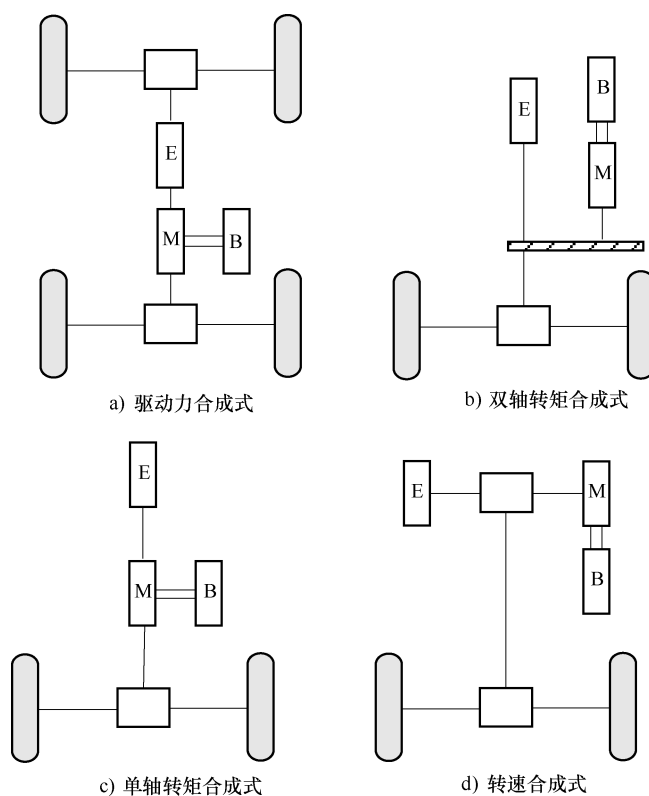


图 2-2-5 并联式混合动力汽车的驱动方式

E—发动机 M—电机 B—蓄电池

(2) 转矩合成式（双轴式和单轴式）

转矩合成式并联混合动力汽车的驱动方式如图 2-2-5b、图 2-2-5c 所示。发动机通过传



动系统直接驱动汽车，并直接（单轴式）或间接（双轴式）驱动电机向蓄电池充电。蓄电池也可向电机提供电能，此时电机处于电动机模式，可用于起动发动机或驱动汽车。

（3）转速合成式

转速合成式并联混合动力汽车的驱动方式如图 2-2-5d 所示。发动机通过离合器和一个“动力组合器”来驱动汽车，电机也通过“动力组合器”来驱动汽车。可利用普通内燃机汽车的大部分传动系统总成，电机只需通过“动力组合器”与传动系统连接，结构简单、改装容易、维修方便。

“动力组合器”通常是一个行星齿轮机构，它可使发动机或电机之间的转速灵活分配，同时使它们的转矩固定在汽车行驶时的转矩上，通过调节发动机节气门的开度来与电机的转速相互配合，获得最佳传动效果，这导致控制装置十分复杂。

2.2.3 混联式混合动力汽车

混联式驱动系统是串联式与并联式的综合系统，其系统结构如图 2-2-6 所示，它主要由发动机、发电机、电动机、行星齿轮机构和蓄电池组等部件组成。发动机发出的功率一部分通过机械传动装置输送给驱动桥，另一部分则驱动发电机发电。发电机输出的电能输送给电动机或蓄电池，电动机产生的驱动力矩通过动力复合装置传递给驱动桥。

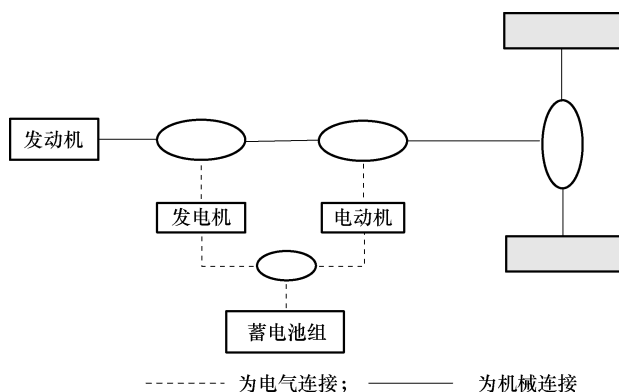


图 2-2-6 混联式混合动力汽车系统机构

混联式驱动系统的控制策略：汽车低速行驶时，驱动系统主要以串联方式工作，汽车高速稳定行驶时，驱动系统主要以并联方式工作。它的综合性能优于串联式（电耦合）和并联式（单一转矩或转速耦合）混合动力驱动系统。就转矩和转速的约束条件而言，在这一驱动系统中，转矩和转速耦合从驱动轮处解脱了发动机，使瞬时的发动机转矩和转速不受车辆负载转矩和车速制约。因此，发动机能以类似于串联式（电耦合）混合动力驱动系统的方式，运行在高效率区。此外，部分发动机功率直接传递到驱动轮，未经多形式转换，这与并联式（转矩或转速耦合）混合动力驱动系统相似。

目前，混联式混合动力结构一般采用行星齿轮机构作为动力分配装置。有一种最佳的混联式结构是将发动机、发电机和电动机通过一个行星齿轮装置连接起来，动力从发动机输出到与其相连的行星架，行星架将一部分转矩传送到发电机，另一部分传送到传动轴，同时，发电机也可通过向电动机供电来驱动传动轴。这种机构有两个自由度，可自由地控制两个不



同的速度。此时车辆并不是串联式或并联式，而是两种驱动形式同时存在，充分利用两种驱动形式的优点，其动力流程如图 2-2-7 所示。

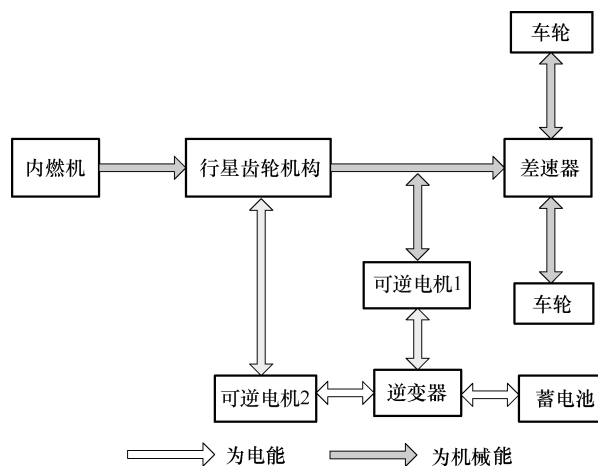


图 2-2-7 混联式混合动力汽车动力流程图

混联式驱动系统充分发挥了串联式和并联式驱动系统的优点，能使发动机、发电机、电动机等部件进行更多的优化匹配，从而在结构上保证了在更复杂的工况下使系统在最优状态下工作，因此更容易实现排放和油耗的控制目标，是最具影响力的混合动力驱动系统。

与并联式相比，混联式的动力复合形式更复杂，因此对动力复合装置的要求更高。目前的混联式结构一般以行星齿轮作为动力复合装置的基本构架。

通过控制离合器、锁定器、发动机和可逆电机，该混联式混合动力电驱动系可满足的运行模式如下。

(1) 转速耦合模式

在该模式中，可逆电机 1 断开，因而存在单发动机牵引、单可逆电机 2 牵引、配置转速耦合的发动机和可逆电机 2 牵引三种子模式。

(2) 转矩耦合模式

当可逆电机 1 通电激励时，其转矩即添加到齿圈的输出转矩上，组成转矩耦合模式。相应于 (1) 中的三种模式，当控制可逆电机 1 运行在电机驱动和发电机发电状态时，可组成六种基本的运行模式。

1) 在单发动机牵引模式中外加可逆电机 1 的驱动（电机模式）。这一模式与一般的并联式混合牵引模式相同。

2) 在单发动机牵引模式中外加可逆电机 1 的发电（发电模式）。这一模式与一般的混合动力电驱动系中峰值电源由发动机充电的模式相同。

3) 在单可逆电机 2 驱动模式中外加可逆电机 1 的驱动。这一模式类似于模式 1) 但发动机由可逆电机 2 予以替代。

4) 在单可逆电机 2 模式中外加可逆电机 1 的发电。这一模式类似于模式 2)，但发动机由可逆电机 2 予以替代。由于部分的可逆电机 2 能量经由可逆电机 2 和可逆电机 1，循环于自峰值电源起始并最终返回峰值电源的流程之中，故此模式可能是绝对不会采用的。



5) 在转速耦合牵引模式中外加可逆电机 1 的驱动。这一模式利用了转速和转矩耦合的全功能。有可逆电机 2 两种运行状态：驱动和发电。可逆电机 2 的驱动运行状态可应用于高车速场合，此时发动机转速可限定在稍低于其中转速的范围，以免过高的发动机转速导致其低运行效率；而可逆电机 2 则向驱动系提供其转速，以承载高车速需求。类似地，发电运行状态可应用于低车速场合，此时发动机可运行在稍低于其中转速的范围，以免过低的发动机转速导致其低运行效率，而可逆电机 2 则吸收部分发动机转速。

6) 在转速耦合牵引模式中外加可逆电机 1 的发电。类似于模式 5)，发动机和可逆电机 2 运行于转速耦合模式，但可逆电机 1 运行在发电模式。

(3) 再生制动

当车辆经历制动时，可逆电机 1、可逆电机 2 或两者同时都能产生制动转矩，并回收部分制动能量向峰值电源充电。此时，随着离合器的分离，发动机关闭。

2.3 混合动力汽车能量管理

2.3.1 混合动力汽车的能量传递路线

混合动力汽车的能量转换装置通常由发电装置（发动机/发电机）、能量储存装置（超级电容、蓄电池等）、变流器、动力传递装置、充放电装置等组成，其能量传递路线可分为 4 条：

- 1) 由发电装置到车轮。
- 2) 由能量储存装置到车轮。
- 3) 由发电装置到能量储存装置。
- 4) 由车轮到能量储存装置（能量回收）。

为使汽车具有良好的动力性能、电驱动性能及合理的能量分配等，电动汽车的能量管理必须对能量传递路线的工作进行有效监测和控制。

根据能量供给方式，混合动力系统基本工作模式可分为：

- 纯电动驱动模式。
- 纯发动机驱动模式。
- 混合驱动模式。
- 行车充电模式。
- 减速/制动能量回收模式。
- 怠速/停车模式等驾驶循环不同阶段对应的工作模式。

2.3.2 混合动力汽车的能量控制策略

能量管理策略的控制目标是根据驾驶人的操作，如对加速踏板、制动踏板等的操作，判断驾驶人的意图，在满足车辆动力性能的前提下，最优地分配电机、发动机、动力电池等部件的功率输出，实现能量的最优分配，提高车辆的燃油经济性和排放性能。由于混合动力汽车中的动力电池不需要外部充电，能量管理策略还应考虑动力电池的荷电状态（SOC）平衡，以延长其使用寿命，降低车辆维护成本。



混合动力汽车的能量管理系统十分复杂，并且因系统组成不同而存在很大差别。下面简单介绍3种混合动力汽车的能量管理策略。

(1) 串联式混合动力汽车能量管理控制策略

由于串联混合动力汽车的发动机与汽车行驶工况没有直接联系，因此能量管理控制策略的主要目标是使发动机在最佳效率区和排放区工作。为优化能量分配整体效率，还应考虑传动系统的动力电池、发动机、电动机和发电机等部件。串联式混合动力汽车有3种基本的能量管理策略。

1) 恒温器策略。当动力电池 SOC 低于设定的低门限值时，起动发动机，在最低油耗或排放点按恒功率模式输出，一部分功率用于满足车轮驱动功率要求，另一部分功率给动力电池充电。而当动力电池 SOC 上升到所设定的高门限值时，发动机关闭，由电机驱动车辆。其优点是发动机效率高、排放低，缺点是动力电池充放电频繁。加上发动机开关时的动态损耗，使系统总体损失功率变大，能量转换效率较低。

2) 功率跟踪式策略。由发动机全程跟踪车辆功率需求，只在动力电池 SOC 大于设定上限，且仅由动力电池提供的功率能满足车辆需求时，发动机才停机或怠速运行。由于动力电池容量小，其充放电次数减少，使系统内部损失减少。但是发动机必须在从低到高的较大负荷区内运行，这使发动机的效率和排放不如恒温器策略。

3) 基本规则型策略。该策略综合了恒温器策略与功率跟踪式策略的优点，根据发动机负荷特性图设定高效率工作区，根据动力电池的充放电特性设定动力电池高效率的 SOC 范围。同时设定一组控制规则，根据需求功率和 SOC 进行控制，以充分利用发动机和动力电池的高效率区，使两者达到整体效率最高。

串联式混合动力汽车主要包含以下工作模式：

- 1) 纯电动模式。发动机关闭，车辆仅由蓄电池组供电、驱动。
- 2) 纯发动机模式。车辆驱动功率仅源于发动机-发电机组，而蓄电池组既不供电也不从驱动系统中获得任何功率，电设备组用作从发动机到驱动轮的电传动系统。
- 3) 混合模式。驱动功率由发动机-发电机组和蓄电池组共同提供。
- 4) 发动机驱动和蓄电池充电模式。发动机-发电机组供给向蓄电池组充电和驱动车辆所需的功率。
- 5) 再生制动模式。发动机-发电机组关闭，驱动电机产生的电功率用于向蓄电池组充电。
- 6) 蓄电池组充电模式。驱动电机不接收功率，发动机-发电机组向蓄电池组充电。
- 7) 混合式蓄电池充电模式。发动机-发电机组和运行在发电机状态下的驱动电机共同向蓄电池组充电。

(2) 并联式混合动力汽车能量管理控制策略

并联式混合动力汽车能量管理的控制，本质上是一个在一定约束条件下的燃料与排放的最优控制问题。一方面，由于行驶路况和驾驶人的操作具有随机性，并联式混合动力汽车的最优控制是一个随机性动态系统的最优控制问题。另一方面，并联式混合动力系统包括众多不同类型的部件，各部件之间存在复杂的协调工作关系，系统工作时各部件的运行状态均处于不断变化中，因此系统的动态方程非常复杂。

同时，并联式混合动力汽车的控制策略与串联式混合动力汽车不同，通常需要根据动力



电池 SOC、驾驶人操作的加速踏板位置、车辆和驱动轮的平均功率等参数进行控制，由发动机和电机输出相应的转矩，以满足驱动轮驱动力矩的要求。由此导致并联式混合动力汽车在能源控制策略上常采用动态优化控制策略和基于模糊逻辑或神经网络的智能控制策略。

并联式混合动力汽车的能量管理策略基本属于基于转矩的控制。目前主要有以下 4 类：

1) 静态逻辑门限策略。该策略通过设置车速、动力电池 SOC 上下限、发动机工作转矩等一组门限参数，限定动力系统各部件的工作区域，并根据车辆实时参数及预先设定的规则调整动力系统各部件的工作状态，以提高车辆整体性能。静态逻辑门限策略实现起来较简单，目前实际应用较广泛。但由于主要依靠工程经验设置门限参数，静态逻辑门限策略无法保证车辆燃油经济性最优，而且这些静态参数不能适应工况的动态变化，无法使整车系统达到最大效率。

2) 瞬时优化能量管理策略。针对静态逻辑门限策略的缺点，一些学者提出了瞬时优化能量管理策略。瞬时优化策略一般采用“等效燃油消耗最少”法或“功率损失最小”法，二者原理类似。其中，“等效燃油消耗最少”法将电机的等效油耗与发动机的实际油耗之和定义为名义油耗，将电机的能量消耗转换为等效的发动机油耗，得到一张类似于发动机万有特性图的电机等效油耗图。在某一个工况瞬时，从保证系统在每个工作时刻的名义油耗最小这一目标出发，确定电机的工作范围（用电机转矩表示），同时确定发动机的工作点，对每一对工作点计算发动机的实际燃油消耗，以及电机的等效燃油消耗，最后选名义油耗最小的点作为当前工作点，实现对发动机、电机输出转矩的合理控制。为将排放一同考虑，该策略还可采用多目标优化技术，以一组权值来协调排放和燃油同时优化存在的矛盾。“等效燃油消耗最少”法在每一步长内是最优的，但无法保证在整个运行区间内最优，而且需要大量的浮点运算和比较精确的车辆模型，计算量大，实现困难。

3) 全局最优能量管理策略。全局最优能量管理策略是应用最优化方法和最优控制理论开发出来的混合动力系统能量分配策略，目前主要有基于多目标数学规划方法的能量管理策略、基于古典变分法的能量管理策略和基于 Bellman 动态规划理论的能量管理策略 3 种。

4) 模糊能量管理策略。该策略基于模糊控制方法来决策混合动力系统的工作模式和功率分配，将“专家”的知识以规则的形式输入模糊控制器中，模糊控制器将车速、动力电池 SOC、需求功率/转矩等输入量模糊化，基于设定的控制规则来完成决策，以实现对混合动力系统的合理控制，从而提高车辆整体性能。

基于模糊逻辑的策略的优点：①可表达难以精确定量表达的规则；②可方便地实现不同影响因素（功率需求、动力电池 SOC、电机效率等）的折中；③鲁棒性好。但是模糊控制器的建立主要依靠经验，无法获得全局最优。

并联式混合动力汽车主要包含以下工作模式：

1) 纯电动模式。当混合动力汽车处于起步、低速等轻载工况，且动力电池电量充足时，若以发动机作为动力源，则发动机燃油效率较低，且排放性能很差。因此，关闭发动机，由动力电池提供能量并以电机驱动车辆。但当动力电池的电量较低时，为保护动力电池，应切换到行车充电模式。

2) 纯发动机模式。在车辆高速行驶等中等负荷情况下，车辆克服路面阻力运行所需的动力较小，一般情况下主要由发动机提供动力。此时，发动机可工作于高效区，燃油效率较高。



3) 混合驱动模式。在加速或爬坡等大负荷情况下,当车辆行驶所需的动力超过发动机工作范围或高效区时,由电机提供辅助动力。若此时动力电池的剩余电量较低,则转换到纯发动机模式。

4) 行车充电模式。在车辆正常行驶等中低负荷情况下,若动力电池的剩余电量较低,则发动机除要提供驱动车辆所需的动力外,还要提供额外的功率,通过电机发电以转换成电能给动力电池充电。

5) 再生制动模式。当混合动力汽车减速/制动时,发动机不工作,电机尽可能多地回收再生制动能量,剩余部分由机械制动器消耗。

6) 怠速/停车模式。在怠速/停车模式中,通常关闭发动机和电机,但当动力电池剩余电量较低时,需要起动发动机和电机,控制发动机工作于高效区并驱动电机为动力电池充电。

(3) 混联式混合动力汽车能量管理控制策略

汽车低速行驶时,驱动系统主要以串联混合动力汽车能量管理控制策略对能量进行管理,汽车高速稳定行驶时,以并联混合动力汽车能量管理控制策略对能量进行管理。

这样的能量管理控制策略能较好地实现汽车的各项性能指标,使发动机工作不受到汽车行驶状况的影响,总是在最高效率状态下工作或自动关闭,使汽车任何时候都可实现低排放及超低排放。但实现该控制策略的技术复杂,能量管理控制器结构设计与制造要求高。

混联式混合动力汽车具有特殊的传动系统结构(如采用行星齿轮传动),因此除采用瞬时优化能量管理策略、全局最优能量管理策略和模糊能量管理策略(与并联式混合动力汽车能量管理策略原理类似)外,还有如下特有的能量管理策略:

1) 发动机恒定工作点策略。由于采用了行星齿轮机构,发动机转速可独立于车速变化,这样使发动机工作在最优工作点,提供恒定的转矩输出,而剩余的转矩则由电机提供。电机负责动态部分,避免了发动机动态调节带来的损失,而且与发动机相比,电机的控制也更为灵敏,易于实现。

2) 发动机最优工作曲线策略。发动机工作在万有特性图中的最佳油耗线上,只有当发电机电流需求超出动力电池的接受能力,或当电机驱动电流需求超出电机或动力电池的允许限制时,才调整发动机的工作点。

混合动力汽车的实际运行工况十分复杂,主要包括起步、加速、减速、巡航、上坡、下坡、制动、停车、倒车等。混合动力汽车由两种动力源驱动。由于发动机和电机这两套动力系统分别具有不同的高效工作区,为充分发挥混合动力系统的优势,汽车在不同的运行工况下,应具有多种不同的工作模式,以充分提高车辆整体性能。

2.3.3 混合动力汽车的制动能量回收系统

混合动力汽车装备了再生制动系统后能充分发挥自身优点,将车辆制动、下坡滑行、减速运行等状态下的部分动能和势能转化为电能存储在蓄电池等储能装置中,有效地利用了车辆制动时的动能,可显著改善车辆的燃油经济性及制动性能,增加混合动力汽车的行驶里程。混合动力汽车再生制动系统的框图如图 2-3-1 所示。

混合动力汽车再生制动系统电机的减速和停止都是通过逐渐减小运行频率来实现的,在变频器变频减小的瞬间,电机的同步转速随之下降,而由于机械惯性的原因,电机转速未



变，或者说其转速变化有一定时间滞后，这时会出现转速大于给定转速，从而产生电机反电动势高于变频器直流端电压的情况，这时电机就转为发电机模式，非但不消耗电能，反而可以通过变频器专用型能量回馈单元向电源充电。这样既有良好的制动效果，又能转化为电能，向电源充电达到回收能量的效果。

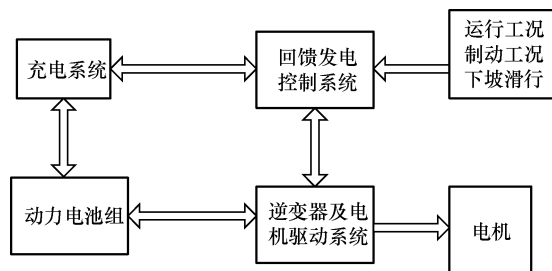


图 2-3-1 HEV 再生制动系统组成

(1) 制动能量回收-液压制动系统

在实际应用上，大部分制动能量回收系统是与液压制动系统一起工作的。因此经常把二者合称为制动能量回收-液压制动系统。制动能量回收-液压制动系统一般应满足 4 方面的要求。

1) 为使驾驶人在制动时有一种平顺感，液压制动力矩应根据制动能量回收力矩的变化进行控制，最终使驾驶人获得所希望的总力矩。同时，液压制动的控制不应引起制动踏板的冲击，以免使驾驶人产生不正常的感受。

2) 为使车辆能稳定制动，前后车轮上的制动力必须很好地平衡分配。

3) 电动汽车没有发动机驱动的液压泵，因此需要一个电动泵来提高液压。液压制动力矩是电控的，将产生的液压传到制动轮缸上。制动能量回收-液压制动系统需要防止制动失效的机构，为提高系统的可靠性，满足安全标准，系统一般采用双管路制动。当其中一条管路失效时，另一条管路必须能提供足够的制动力。

4) 为防止汽车发生滑移，施加在前后轮上的最大制动力应低于允许的最大值（主要由滚动阻力系数决定）。

(2) 制动能量回收系统及控制策略

混合动力汽车一般有 4 种不同的制动控制策略：具有最佳制动感受的串联制动、具有最佳能量回收率的串联制动、并联制动及 ABS 防抱死制动。

纯电动汽车技术



纯电动汽车指以车载电源为动力，用电机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的车辆。纯电动汽车一般以高效率充电蓄电池为动力源，无需内燃机。因此，纯电动汽车的电机相当于传统汽车的发动机，蓄电池相当于油箱，电能是二次能源，可通过风能、水能、热能、太阳能等多种方式获得。

纯电动汽车与汽油车、柴油车相比省去了发动机、变速器、冷却系统、油箱和排气系统，而且电机和控制器的成本较内燃机低、能量转换效率也高，是未来最具商业价值的汽车发展方向之一。纯电动汽车的主要优点是既节能又具有广泛的环保效应。研究显示，使用纯电动汽车行驶 1km 所需要的费用比汽油车少 80%~90%，且基本无排放。

纯电动汽车作为新一轮经济增长的突破口和实现交通能源转型的根本途径，已经成为很多国家的共同战略选择。在各国政府的大力推动下，汽车产业进入了全面的交通能源转型时期，纯电动汽车进入了加速发展的新阶段。

3.1 纯电动汽车技术发展产业化面临的问题

目前市场上主要采用铅酸电池、镍氢电池和锂电池作为动力电池，它们的实际性能指标和市场平均价格见表 3-1-1。根据实际装车时的循环寿命和市场价格，可估算出纯电动汽车从各种动力电池上每获得 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能所付出的费用。

表 3-1-1 各种动力电池的主要性能/价格参数

电 池 类 型	铅 酸 电 池	镍 氢 电 池	锂 电 池
比能量 ($\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)	35 ~ 45	55 ~ 75	80 ~ 300
车上循环寿命/次	约 300	约 800	>3000
市场平均价 (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)	约 500	约 5000	约 4000
动力电池放电价 (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)	约 3.05	约 9.6	约 10.2

计算时，假设：

① 动力电池最高可充电荷电状态 (SOC) 为 90%，放电截止 SOC 为 20%，即实际可用的动力电池容量仅占总容量的 70%。

② 由电网供电价为 0.5 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

③ 动力电池的平均充放电效率为 75%。

可知，虽然从电网取电仅需 0.5 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，但充入动力电池，再从动力电池取出，铅酸电池每获得 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能，价格为 3.05 元左右，其中 2.38 元为动力电池折旧费，0.67 元



为电网供电费，而从镍氢电池中每获得 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能，费用为 9.6 元，锂电池为 10.2 元，即后两种先进动力电池供电成本是铅酸电池的 3 倍多。

目前国内市场上用柴油机发电，价格大致为 3 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，若用汽油机发电，则供电价格估计为 4 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，即从铅酸电池获得电能的价格大致和柴油机发电价格相等，仅从取得能量的成本来考虑，采用铅酸电池比汽油机驱动有一定价格优势。但是铅酸电池太过笨重，充电时间又长，因此只被用于车速低于 50km/h 的各种场地车、高尔夫球车、垃圾车、叉车及电动自行车。实践证明，铅酸电池在这一低端产品市场仍具备一定的竞争力和实用性。

镍氢电池的主要优点是相对寿命较长，但是由于镍金属占其成本的 60%，导致镍氢电池价格居高不下。锂电池技术发展很快，其比能量由 $100\text{W}\cdot\text{h/kg}$ 逐步增加到 $180\text{W}\cdot\text{h/kg}$ ，比功率可达 2000W/kg ，循环寿命达 3000 次以上，其中钛酸锂电池可达 10000 次以上，工作温度范围达 $-40\sim 55^\circ\text{C}$ 。

近年来，由于磷酸铁锂电池的研发获得重大突破，动力电池的安全性和可靠性得以大幅提高。目前已有许多发达国家将锂电池作为纯电动汽车用动力电池的首选。未来，纯电动汽车技术发展与产业化要解决的问题主要包括：

1) 选择和确定纯电动汽车的充电模式。目前各国针对纯电动汽车充电形成了两种技术方案：一种是更换动力电池，另一种是使用可插入电源。充电模式不仅涉及技术路线和标准制定，更重要的是会影响纯电动汽车的产业组织和商业模式。动力电池更换与插入式充电相比，一方的优势正是另一方的缺陷，因此需要权衡利弊。随着动力电池技术和充电技术的发展，两者的优势对比也会不断发生变化。

采用动力电池更换充电模式，整车和动力电池的所有权分离。雷诺公司采取这种模式与美国电动汽车服务提供商 Better Place 公司开展合作，推广纯电动汽车动力电池更换技术。在合作过程中，雷诺致力于供应纯电动汽车，而 Better Place 公司则着手建造和运营充电站和动力电池更换站网络。车载动力电池电量将要耗尽时，车主可以驾车到充电站，更换另一套已充好电的动力电池。在充电站，机械手自动更换动力电池包，方便快捷。但是这种模式要求所有纯电动汽车动力电池的形状、尺寸和布置完全一致。近几年，Better Place 公司先后与丹麦、澳大利亚、美国、日本、加拿大、以色列等国的相关部门和企业展开了合作。

更换动力电池的优势：

➤ 能利用大公司的资本和网络，集中建设动力电池专业更换站，有效解决充电网络和充电时间的难题。

➤ 通过动力电池运营企业的专业设备和维护，可以提升动力电池充电的规范性和安全性，有利于稳定动力电池性能并延长使用寿命。

➤ 通过整车和动力电池分离，能大大降低消费者的购车成本，有利于纯电动汽车的快速推广。

外接电源充电模式可通过家用电源和专业快速充电设施两种方案解决充电问题。外接电源充电的优势在于方便灵活，消费者只要有电力供应的地方就都能为纯电动汽车充电，出行方便。

从汽车厂商的角度考虑，只提供不装动力电池的裸车，就有可能失去核心部件（动力电池）及充电领域控制权，这会减弱其对汽车产业链的控制力，进而沦为纯电动汽车产业



链的配角，此外拿到的政府补贴也较少。因此，尽管更换动力电池模式具有一定优势，但除在商用车上有所试验外，在乘用车领域很难获得汽车整车企业的全力支持。

2) 提升动力电池性能，缓解消费者“里程焦虑”。“里程焦虑”是制约纯电动汽车发展的重要因素。“里程焦虑”指续驶里程较短而使消费者出行的顾虑增加，这是除动力电池在极端温度下的容量保持和安全等技术性问题外，影响纯电动汽车商业化的重要因素。据调查数据显示，世界各地消费者对纯电动汽车的要求基本一致，即一次充电续驶里程达到300km，充电时间最好不超过2h。即使纯电动汽车在技术上不存在问题，各大厂商还是将插入式油电混合动力汽车作为商业化的重点，通过引入燃油发动机来缓解“里程焦虑”问题。

以磷酸铁锂为正极材料的锂电池技术的发展，使动力电池在能量密度等性能指标上有了很大提升，成为锂离子动力电池的主要类型。亚洲企业在车用电池领域有绝对优势，北美和欧洲汽车企业大多采购日本、韩国和中国的动力电池。例如日产聆风采用的薄型化锂电池模块，由日产与 NEC 合资的 AESC 汽车能源公司生产供应。通用 Volt 主要配装韩国 LG 化学公司生产的动力电池。日本松下公司 90 亿美元并购三洋公司后，使日本在镍氢电池和锂电池领域的主导地位进一步加强。

3) 如何降低纯电动汽车的生产成本和销售价格。无论插电式混合动力汽车还是纯电动汽车，降低成本都是企业的关注重点之一。纯电动汽车主要成本源于动力电池。目前推出的纯电动汽车价格大多在 2.5 万 ~ 3 万美元之间，其中动力电池成本大致占 1/3。即使有政府补贴，对于大部分消费者来说，也很难接受。从近两年动力电池研发情况看，未来几年内，车用锂离子动力电池的价格有可能下降至消费者可接受水平。2010 年，纯电动汽车用快充锂离子动力电池价格为 800 ~ 1000 美元/kW · h，按照目前美国汽油和电力的价格变化趋势，当车用动力电池价格下降到 200 ~ 300 美元/kW · h 时，纯电动汽车使用成本将与传统汽车相当。根据美国能源部预测，2020 年全球动力电池单位成本有望下降到 300 美元，到 2030 年进一步下降到 100 美元。另据世界银行预测，到 2020 年，动力电池单元成本和动力电池组成本将分别下降 65% 和 40%，届时动力电池成本将从 2010 年的 800 美元/kW · h 下降至 325 美元/kW · h。

但是，大规模普及纯电动汽车，仅靠动力电池价格下降是不够的，其他零部件成本也要相应降低。要使纯电动汽车在短期内对消费者具有足够的吸引力，如何快速降低其生产成本和销售价格，将成为影响纯电动汽车产业化进程的重要因素。

4) 推进纯电动汽车全球统一标准的制定。对于纯电动汽车的商业化推广，统一标准成为关键问题。美国、欧洲、日本都在试图将本地标准体系上升为国际标准，以达到占据世界纯电动汽车发展主导地位、进而改变自己和竞争对手的成本对比情况的目的。标准是企业开展合作和加快拓展国际市场的重要基础，出台统一的纯电动汽车生产、充电等标准体系，对于世界主要地区协同互动推进纯电动汽车产业至关重要。

3.2 纯电动汽车的特点与结构原理

3.2.1 纯电动汽车的类型与特点

纯电动汽车可分为用纯蓄电池作为动力源的纯电动汽车和装有辅助动力源的纯电动汽车两种类型。用单一蓄电池作为动力源的纯电动汽车，只装备了蓄电池组，它的电力和动力传



输系统如图 3-2-1 所示。

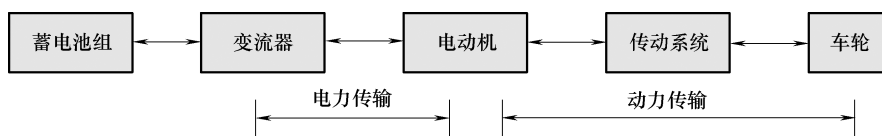


图 3-2-1 用单一蓄电池作为动力源的纯电动汽车的电力和动力传输系统

用单一蓄电池作为动力源的纯电动汽车，蓄电池的比能量和比功率较低，蓄电池组的质量和体积较大。因此，在某些纯电动汽车上增加辅助动力源，如超级电容、发电机组、太阳能装置等，以改善纯电动汽车的起动性能并增加续驶里程。装有辅助动力源的纯电动汽车的电力和动力传输系统如图 3-2-2 所示。

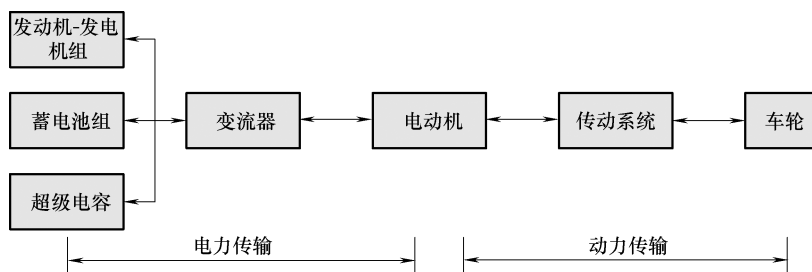


图 3-2-2 装有辅助动力源的纯电动汽车的电力和动力传输系统

纯电动汽车与燃油汽车相比，具有以下特点：

1) 无污染、噪声低。纯电动汽车无燃油汽车工作时产生的废气，不产生排气污染，对环境保护和空气的洁净十分有益。纯电动汽车无内燃机产生的噪声，电机的噪声也较内燃机小。

2) 能源效率高、多样化。纯电动汽车的能源效率已超过燃油汽车，在城市运行、走走停停、行驶速度不高时，纯电动汽车的优势更明显。纯电动汽车停止时不消耗电能，在制动过程中，电机可自动转化为发电机，实现制动减速时能量的再利用。同时，纯电动汽车的应用可有效减少对石油资源的依赖，可将有限的石油用于更重要的方面。向蓄电池充电的电力可以由煤炭、天然气、水力、核能、太阳能、风力、潮汐等能源转化。除此之外，如果夜间向蓄电池充电，还可避开用电高峰，有利于电网均衡负荷，减少费用。

3) 结构简单、使用维修方便。电动汽车较燃油汽车结构简单，运转、传动部件少，维修保养工作量小。当采用交流感应电机时，电机基本上不用保养维护，更重要的是纯电动汽车易操纵。

4) 动力电源使用成本高、续驶里程短。目前纯电动汽车尚不如内燃机汽车技术完善，尤其是动力电池的寿命短、使用成本高。动力电池的存储能量小，一次充电后续驶里程不理想，且纯电动汽车的价格较贵。

3.2.2 纯电动汽车的结构原理

纯电动汽车的工作原理是通过蓄电池产生电流，经过电力调节器（逆变器）将电能输送到电机，再通过动力传动系统驱动汽车行驶。纯电动汽车的硬件主要由底盘、车身、蓄电



池组、电机、控制器和辅助设施 6 部分组成。由于电机具有良好的驱动特性，纯电动汽车的传动系统不需要离合器和变速器。车速由控制器通过调速系统改变电机的转速来控制。

燃油汽车主要由发动机、底盘、车身和电气 4 大部分组成，而纯电动汽车的结构与燃油汽车相比，主要增加了电力驱动控制系统，而取消了发动机，电力驱动控制系统的组成与工作原理如图 3-2-3 所示，它由电力驱动主模块、车载电源及控制模块和辅助模块 3 大部分组成。

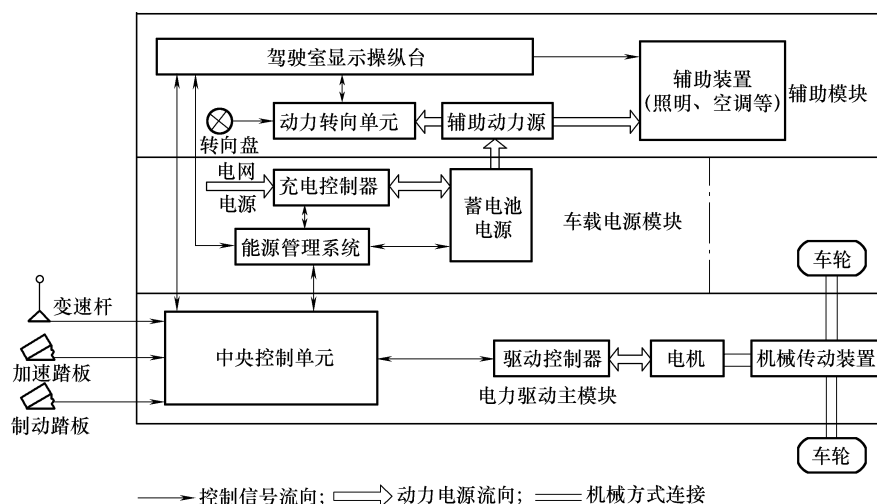


图 3-2-3 电力驱动控制系统的组成与工作原理

汽车行驶时，由蓄电池输出电能（电流），通过控制器驱动电机运转，电机输出的转矩经传动系统带动车轮正转或倒转（前进或后退）。电动汽车续驶里程与蓄电池容量有关，蓄电池容量受诸多因素限制。要提高一次充电续驶里程，则必须尽可能节省蓄电池的能量。

（1）电力驱动主模块

电力驱动主模块主要包括中央控制单元、驱动控制器、电机、机械传动装置和车轮等。其作用是将存储在蓄电池中的电能高效地转化为车轮的动能，并能在汽车减速制动时，将车轮的动能转化为电能充入蓄电池。

中央控制单元根据加速踏板和制动踏板的输入信号，向驱动控制器发出相应的控制指令，对电机进行起动、加速、减速、制动控制。

驱动控制器按中央控制单元的指令、电机的速度和电流反馈信号，对电机的速度、驱动转矩和旋转方向进行控制。驱动控制器必须与电机配套使用。

机械传动装置是将电机的驱动转矩传输给汽车的驱动轴。

电机在纯电动汽车中需要承担电动机和发电机的双重功能，即在正常行驶时发挥其主要的电动机功能，将电能转化为机械能；在减速和下坡滑行时则转换为发电机，将车轮的惯性动能转化为电能。因为汽车使用工况比较复杂，所以纯电动汽车对电机的要求比较高。基本要求如下：

- 1) 较大范围的调速性能。
- 2) 高效率，低损耗。



- 3) 在车辆减速时实现制动能量回收并反馈给蓄电池。
- 4) 电机的重量、各种控制装置的重量和冷却系统的重量等尽可能小。
- 5) 电气系统和控制系统的安全性,都必须符合国家(或国际)有关车辆电气控制的安全性能的标准和规定,装备高压保护设备。
- 6) 可靠性好、耐温和耐湿性能强,能在较恶劣的环境下长期工作。
- 7) 结构简单、适合大批量生产、运行噪声低、使用维修方便、价格便宜等。

(2) 车载电源及控制模块

车载电源模块主要包括蓄电池电源、能量管理系统和充电控制器等。其作用是向电机提供驱动电能、监测电源使用情况并控制充电机向蓄电池充电。

纯电动汽车的能量管理主要指蓄电池管理系统,它的主要功用是对纯电动汽车用蓄电池单体及整组进行实时监控、充放电、巡检、温度监测等。充电控制器将交流电转化为相应电压的直流电,并按要求控制其电流。

(3) 辅助模块

辅助模块主要包括辅助动力源、动力转向系统、驾驶室显示操纵台和辅助装置等。

辅助动力源主要由辅助电源和 DC/DC 转换器组成,其作用是供给纯电动汽车其他辅助装置所需的电能,一般为 12V 或 24V 的直流低压电源,它主要给动力转向单元、制动力调节控制、照明、空调、电动门窗等辅助装置提供电能。

动力转向单元是为使汽车转向设置的,它由转向盘、转向器、转向机构和转向轮等组成。作用在转向盘上的控制力,通过转向器和转向机构使转向轮偏转一定角度,最终使汽车转向。

驾驶室显示操纵台类似于传统汽车驾驶室的仪表盘,不过其功能根据纯电动汽车的驱动控制特点而有所增减,其信息指示更多地选用数字方式。

辅助装置主要有照明、声光信号装置、车载音响设备、空调、刮水器、风窗除霜清洗器、电动门窗、电控玻璃升降器、电控后视镜调节器、电动座椅调节器、车身安全防护装置控制器等。它们主要是为提高汽车的操控性、舒适性和安全性而设置的,可根据需要选装。

3.2.3 纯电动汽车驱动系统布置形式

驱动系统是纯电动汽车的核心部分,其性能决定了纯电动汽车的运行性能。纯电动汽车的驱动系统布置取决于电机的驱动方式。常见的驱动系统布置形式如图 3-2-4 所示。

(1) 传统的驱动模式

图 3-2-4a 所示布置形式与传统汽车驱动系统的布置形式一致,带有变速器和离合器,只是将发动机换成电机,属于改造型纯电动汽车。这种布置形式可提高纯电动汽车的起动转矩,增加低速行驶时的后备功率。

(2) 电机-驱动桥组合式驱动模式

图 3-2-4b 和 c 所示布置形式取消了离合器和变速器,但具有减速/差速机构,由 1 台电机驱动 2 个车轮旋转。优点是可沿用传统汽车的动力传动装置,只需要一组电机和逆变器。这种方式对电机的要求较高,不仅要求电机具有较高的起动转矩,还要求其具有较大的后备功率,以保证纯电动汽车的起动、爬坡和加速超车等动力性能。



(3) 电机-驱动桥整体式驱动模式

图 3-2-4d 所示布置形式将电机装到驱动轴上，直接由电机实现变速和差速转换。这种传动方式同样对电机有较高的要求，要求有大的起动转矩和后备功率，同时要求控制系统有较高的控制精度，并具备良好的可靠性，从而保证纯电动汽车行驶的安全、平稳。

(4) 轮毂电机驱动模式

图 3-2-4e 和图 3-2-4f 与图 3-2-4d 所示布置形式接近，将电机直接装到驱动轮上，由电机直接驱动车轮转动。

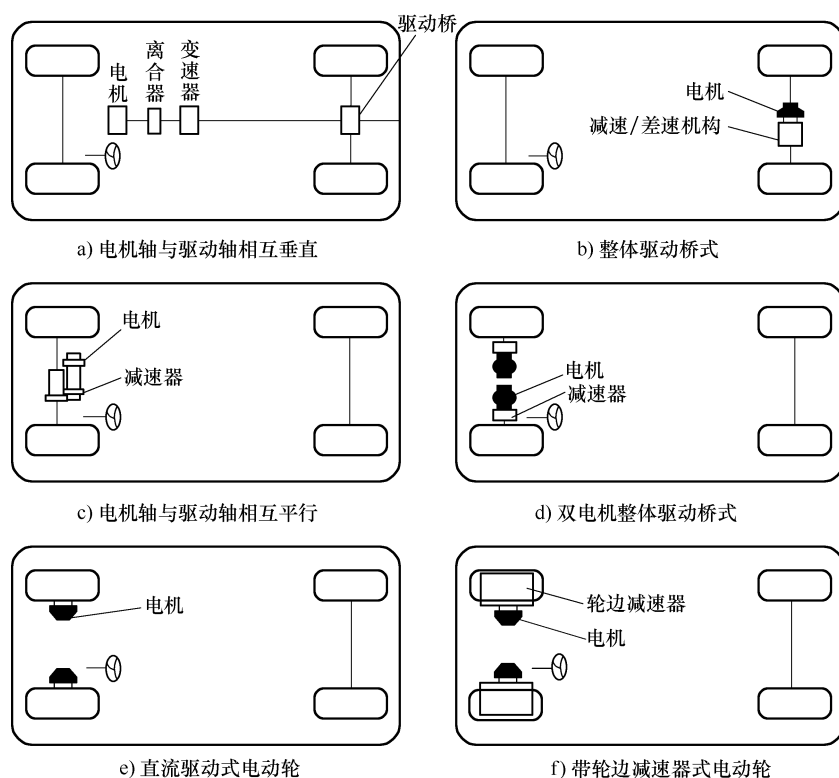


图 3-2-4 纯电动汽车驱动系统布置形式

目前，我国的纯电动汽车大都建立在改装现有传统汽车的基础上，其设计属于机电一体化的综合工程。高性能并不是简单地将内燃机汽车的发动机和油箱换成电机和蓄电池便可获得的，必须对蓄电池、电机、变速器、减速器和控制系统等参数进行合理匹配，且在总体方案布置时保证连接可靠、轴荷分配合理等。

3.2.4 纯电动汽车驱动系统设计

纯电动汽车的电机应有较高的转动惯量比、尽可能宽的高效率区和良好的转矩转速特性。在目前应用的电机驱动系统中，直流电机虽然具有良好的控制特性，但碍于其固有的缺陷，在纯电动汽车中的应用越来越少。笼式感应电机结构简单、运行可靠，大量应用在纯电动汽车中，但其功率密度和效率一般。开关磁阻电机结构更为简单，效率、转矩惯量比也较高，但其力矩波动及噪声过大，在纯电动汽车上的应用还不普遍。永磁无刷电机具有最高的



效率、转矩惯量比，在纯电动汽车中得到了广泛应用。

(1) 电机的参数匹配

1) 纯电动汽车动力系统参数匹配的基本原则。电机的功率直接影响整车的动力性能。电机功率越大，车的后备功率越大，加速性和最大爬坡度越好，但同时会增加电机的体积和重量，正常行驶时电机不能在高效率区工作，降低了车辆的续驶里程。因此，设计时通常依照纯电动汽车的最高车速、初速度、末速度、加速时间和最大爬坡度来确定电机的功率。

2) 电机额定转速及最高转速的选择。电机的最高转速对电机成本、制造工艺和传动系统尺寸有很大影响。转速在 6000r/min 以上的为高速电机， 6000r/min 以下的为普通电机。前者成本高、制造工艺复杂且对配套使用的轴承、齿轮等有特殊要求，一般适用于 100kW 以上的大功率驱动电机，很少在纯电动客车上使用。因此应采用最高转速低于 6000r/min 的低速电机。电机最高转速与额定转速的比值也称电机扩大恒功率区系数，随该系数的增大，电机可在低转速区获得较大转矩，有利于提高车辆的加速和爬坡性能，但同时会导致电机工作电流增大，并使逆变器的功率损耗和尺寸相应增大。因此，电机扩大恒功率区系数一般取 $2\sim 4$ 。计算出电机额定转速应在 $1500\sim 3000\text{r/min}$ 之间。

3) 电机额定电压的选择。电机额定电压的选择与纯电动汽车动力电池组电压密切相关。在相同输出功率条件下，动力电池组电压高，则电流小，对导线和开关等电器元件要求较低，但较高的电压需要数量较多的单体电池串联，导致成本及整车质量的增加和动力性能的下降，且难于布置。电机额定电压一般由所选取的电机的参数决定，并与电机额定功率成正比。电机的额定电压越高，其额定功率越大。考虑上述结果，确定电机的额定电压范围为 $300\sim 350\text{V}$ 。近年来，电机及驱动系统的控制系统趋于智能化和数字化。各车企分别将变结构控制、模糊控制、神经网络控制、自适应控制、专家控制、遗传算法等非线性智能控制技术，结合应用于纯电动汽车的电机控制系统中。

(2) 纯电动汽车传动系统的参数匹配

纯电动汽车在行驶过程中所遇到的阻力随车速的变化而变化，变化范围很宽，因此单靠电机的力矩变化无法满足纯电动汽车的行驶性能要求。为满足纯电动汽车的行驶性能，同时也使电机经常保持在高效率工作区内，以减轻电机和动力电池组的负荷，应在纯电动汽车的电机和驱动轮之间安装减速器和变速器。

纯电动汽车的传动系统参数匹配设计主要包括变速器的匹配设计和主减速器的匹配设计。在电机输出特性一定时，传动系统传动比的选择主要取决于纯电动汽车的动力性要求，即最大传动比取决于整车的最大爬坡度，最小传动比取决于整车的最高车速。

1) 最大传动比的选择。传动系统最大传动比是变速器最低档传动比与主减速器传动比的乘积，由电机峰值扭矩和车辆最大爬坡度决定。

2) 最小传动比的选择。传动系统最小传动比是变速器最高档传动比与主减速器传动比的乘积，由电机的最高转速和车辆最高速度决定。随着电机及其控制技术的发展，高转速、宽调速范围得以实现。纯电动汽车要求电机既能在恒转速区提供较高的瞬时转矩，又能在恒功率区提供较高的转速。

(3) 动力电池的参数匹配

动力电池系统是纯电动汽车的能量源，为整车提供驱动电能。动力电池系统的体积、形



状和技术参数影响纯电动汽车的行驶性能。纯电动汽车动力电池系统的参数匹配主要包括动力电池类型的选择、动力电池组电压和能量的选择。纯电动汽车要求动力电池系统具有较高的比能量和比功率,以满足汽车的续驶里程和动力性能要求,同时也需要动力电池系统具有与汽车使用寿命相当的充放电循环寿命,拥有高效率、良好性价比以及免维护特性。具体要求如下:

- 1) 能量密度高,以提高运行效率和续驶里程。
- 2) 输出功率密度高,以满足驾驶性能要求。
- 3) 工作温度范围广,以满足夏季高温和冬季低温的运行需要。
- 4) 循环寿命长,保证动力电池的使用年限和行驶总里程。
- 5) 无记忆效应,以满足车辆处于非完全放电状态下的充电需要。
- 6) 自放电率小,满足车辆较长时间的搁置需求。
- 7) 安全性好、可靠性高以及可循环利用。

纯电动汽车动力电池系统的参数匹配主要包括动力电池类型的选择、动力电池组电压和能量的选择。

1) 动力电池类型的选择。根据对动力电池特性的分析和动力电池的匹配原则,选择合适的动力电池。

2) 动力电池组电压的选择。在匹配动力电池组电压时,要求动力电池组的电压等级与驱动电机的电压等级一致,并满足驱动电机电压变化的要求。由于电动空调、电动真空泵和电动转向助力器等附件的功率消耗,动力电池组的总电压要高于电机的额定电压。一般车载动力电池的放电电流不超过 300A。

3) 动力电池组能量的选择。动力电池能量指标是体现动力电池价值的最重要参数。对于纯电动汽车,动力电池组能量的大小由续驶里程决定。纯电动汽车的续驶里程可通过工况法或等速法测定。工况法指将纯电动汽车置于工况试验环境下以工况行驶速度经行驶试验,试验期间行驶的总距离即为续驶里程。等速法指让纯电动汽车以恒定速度在道路上行驶,由于不同车速下的续驶里程不同,根据续驶里程与车速的关系,当车速在 30 ~ 63km/h 范围内时有较大的续驶里程。纯电动汽车常采用等速法对续驶里程进行测定。

3.3 纯电动汽车的核心技术

3.3.1 动力电池技术

动力电池是纯电动汽车的动力源,是纯电动汽车最核心的技术之一,但同时也是目前制约纯电动汽车发展的关键因素。动力电池的主要性能指标包括比能量、能量密度、比功率、循环寿命、充电时间和成本等。要使纯电动汽车能与燃油汽车竞争,关键是要开发出比能量高、比功率大、使用寿命长的高效动力电池。

动力电池组性能直接影响整车的加速性能、续驶里程及制动能量回收效率等。动力电池的成本和循环寿命直接影响车辆的成本和可靠性,必须对所有影响动力电池性能的参数进行优化。纯电动汽车的动力电池在使用中发热量很大,温度会直接影响动力电池电化学系统的运行、循环寿命和充电可接受性、功率和能量、安全性和可靠性等。因此,



为了达到最佳的性能和寿命,需将动力电池组的温度控制在一定范围内,减小动力电池组内不均匀的温度分布,以避免模块间的不平衡,最终避免动力电池性能下降,并消除相关的潜在危险。

制约纯电动汽车发展的主要问题集中于动力电池成本较高、充电时间长,整车续航里程较短。目前镍氢电池和锂电池广泛应用于混合动力车辆。其中,镍氢电池可快速充电,循环寿命长,不存在重金属污染,但比能量没有锂电池高。锂电池有很多种类,例如锂电池、锂熔盐电池、锂聚合物电池,它们都具备较高的能量密度,且比功率大、比能量高。试验表明,改进的螺旋缠绕铅酸电池的能量密度极限值约为 $40\text{W} \cdot \text{h/kg}$,镍氢电池为 $65\text{W} \cdot \text{h/kg}$,锂电池则约为 $300\text{W} \cdot \text{h/kg}$ 。近年来,技术创新使锂电池在寿命和稳定性方面有了大幅提升,因此锂电池很可能成为纯电动汽车的主力电池类型。

3.3.2 电机驱动及控制技术

(1) 驱动电机

驱动电机属于特种电机,是纯电动汽车的关键部件。要使纯电动汽车有良好的使用性能,驱动电机应具有较宽的调速范围及较高的转速,足够大的起动转矩,体积小、重量轻、效率高,且有动态制动和能量回馈功能。另外,还要求可靠性强、耐高温、耐潮、结构简单、成本低、维护简单、适合大规模生产等。目前,纯电动汽车用电机有直流电机(DCM)、感应电机(IM)、永磁无刷电机(PMBLM)和开关磁阻电机(SRM)四种形式,它们正在向大功率、高转速、高效率 and 小型化方向发展。

驱动电机应具有良好的转矩—转速特性,一般具有 $6000 \sim 15000\text{r/min}$ 的转速。根据车辆行驶工况,驱动电机可以在恒转矩区和恒功率区运转。驱动电机应经常保持在高效率范围内运转。在低速—大转矩(恒转矩区)运转范围内效率为 $0.75 \sim 0.85$,在恒功率运转范围内效率为 $0.8 \sim 0.9$ 。

驱动电机可在相当大的速度范围内高效地产生转矩,这意味着甚至只需单级减速齿轮就可驱动车辆。电机与发动机相比有两大技术优势:①发动机能高效产生转矩时的转速被限制在一个较小的范围内(经济运行区),因此需要变速器适应这一特性;②由于引入了高度电气化的控制系统,电机实现动力输出的快速响应能力远高于发动机。

近年来,由感应电机驱动的纯电动汽车几乎都采用矢量控制和直接转矩控制。直接转矩控制系统的结构简单、控制性能优良和动态响应迅速,因此非常适合纯电动汽车。美国和欧洲研制的纯电动汽车多采用以这种方式控制的感应电机。

永磁无刷电机可分为由方波驱动的无刷直流电机系统(BLDCM)和由正弦波驱动的无刷直流电机系统(PMSM),它们都具有较高的功率密度。其控制方式与感应电机基本相同,因此在纯电动汽车上得到了广泛应用。PMSM类电机具有较高的能量密度和效率,其体积小、惯性低、响应快,非常适合纯电动汽车的驱动系统,日本研制的纯电动汽车主要采用这种电机。

开关磁阻电机(SRM)具有简单可靠、可在较宽转速和转矩范围内高效运行、控制灵活、可四象限运行、响应速度快和成本较低等优点。但实际应用发现SRM存在转矩波动大、噪声大、需要位置检测器等缺点,这使其应用受到了限制,因此目前主要应用于客车等商用车。



随着电机及驱动系统的发展,控制系统趋于智能化和数字化。变结构控制、模糊控制、神经网络、自适应控制、专家系统、遗传算法等非线性智能控制技术,都将单独或结合应用于纯电动汽车的电机控制系统。它们的应用将使系统结构简单、响应迅速、抗干扰能力强、参数变化具有鲁棒性,可大大提高整个系统的综合性能。

(2) 电力驱动控制

电力驱动控制系统是纯电动汽车的神经中枢,它将电机、动力电池和其他辅助系统连接起来并加以控制。电力驱动控制系统按工作原理可分为车载电源模块、电力驱动主模块和辅助模块三大部分。

车载电源模块主要由动力电池电源、能源管理系统和充电控制器三部分组成。由于电机驱动所需的等级电压往往与辅助装置的电压要求不一致,辅助装置一般要求 12V 或 24V 的低压电源,而电机驱动一般要求为高压电源,且所采用的电机类型不同,要求的电压等级也不同。为满足要求,可用多个 12V 或 24V 的蓄电池串联成 96 ~ 384V 高压直流蓄电池组,再通过 DC/DC 变换器供给所需的不同电压。

驱动控制系统直接影响纯电动汽车的行驶性能,该系统控制车辆在各种工况下的行驶速度、加速度和能源转换情况。驱动系统的关键问题:

- 1) 电机逆变器、控制系统和纯电动汽车使用条件的合理匹配。
- 2) 智能化控制系统的工程应用及其减轻重量、降低造价、抗振、抗扰和降噪的研究。
- 3) 提高控制系统在电机制动时能量回收效率的研究。

新型纯电动汽车整车控制系统是两条总线的网络结构,即驱动系统的高速 CAN 总线和车身系统的低速总线。高速 CAN 总线每个节点为各子系统的 ECU,低速总线按物理位置设置节点,基本原则是基于空间位置的区域自治。

实现整车网络化控制,其意义不只是解决汽车电子化中出现的线路复杂和线束增加问题,网络化实现的通信和资源共享能力成为新的电子与计算机技术在汽车上应用的一个基础,同时也为 X-by-Wire 技术提供了有力支撑。

3.3.3 能量管理技术

能源管理系统的主要功能是在汽车行驶中进行能源分配,协调各功能部分工作的能量管理,使有限的能量源最大限度地得到利用。能源管理系统与电力驱动主模块的中央控制单元配合,一起控制发电回馈,在纯电动汽车降速制动和下坡滑行时进行能量回收,从而提高纯电动汽车的续驶能力。纯电动汽车要获得好的动力性能,必须对蓄电池组进行系统管理。设计优秀的纯电动汽车除有良好的机械性能、电驱动性能外,还应具备协调各个功能部分工作的能量管理系统,其作用是检测单个蓄电池或蓄电池组的荷电状态,并根据各种传感信息,包括力、加减速命令、行驶路况、蓄电池工况、环境温度等,合理调配和使用有限的车载能量。此外,它还要能根据蓄电池组的使用情况和充放电历史选择最佳充电方式,以尽可能延长蓄电池寿命。

电力驱动主模块主要由中央控制单元、驱动控制器、电机、机械传动装置等组成。中央控制单元根据加速踏板与制动踏板的输入信号,向驱动控制器发出相应的控制指令,对电机进行起动、加速、降速、制动控制。驱动控制器的功能是按中央控制单元的指令和电机的速度、电流反馈信号,对电机的速度、驱动转矩和旋转方向进行控制。



纯电动汽车的实时蓄电池监控系统可实时监测蓄电池的电压、电流和温度，并记录下蓄电池的充放电次数等各种影响蓄电池工作状态的参数，较准确地估算出蓄电池的状态和最佳工作参数。根据这些实时信息，可随时让使用者了解蓄电池的真实情况，更加合理地使用纯电动汽车，并能更好地提前做好维护工作，延长纯电动汽车的使用寿命。同时，内置的MCU 控制程序可主动对不合理的使用情况进行管理和保护，既可最大限度地满足使用者的要求，也可主动避免因使用不当而对蓄电池等主要部件造成影响。

3.3.4 整车轻量化技术

整车轻量化技术始终是汽车技术重要的研究内容。由于布置了蓄电池组，纯电动汽车整车重量增加较多，轻量化问题更加突出，可采用以下措施减轻整车重量：

- 1) 通过对整车实际使用工况和使用要求的分析，对蓄电池的电压、容量、驱动电机功率、转速和转矩、整车性能等车辆参数的整体优化，合理选择蓄电池和电机参数。
- 2) 通过结构优化和集成化、模块化优化设计，减轻动力总成、车载能源系统的重量。这里包括对电机及驱动器、传动系统、冷却系统、空调和制动真空系统的集成和模块化设计，使系统得到优化。通过蓄电池、蓄电池箱、蓄电池管理系统、车载充电机组成的车载能源系统的合理集成和分散，实现系统优化。
- 3) 积极采用轻质材料，如蓄电池箱的结构框架、箱体封皮、轮毂等采用轻质合金材料。
- 4) 利用 CAD 技术对车身承载结构件（如前后桥，新增的边梁、横梁等）进行有限元分析研究，用计算和试验相结合的方式，实现结构最优化。

3.4 纯电动汽车能量管理与利用

3.4.1 纯电动汽车的能量管理系统

纯电动汽车的能量管理系统由硬件系统和软件系统组成。能量管理系统具有从纯电动汽车各子系统采集运行数据，控制完成蓄电池充电，显示蓄电池荷电状态（SOC），预测剩余行驶里程，监控蓄电池状态，调节车内温度，调节车灯亮度，以及回收再生制动能量为蓄电池充电等功能，如图 3-4-1 所示。

纯电动汽车能量管理系统主要由蓄电池输入控制器、车辆运行状态参数、车辆操纵状态、能量管理系统、蓄电池输出控制器、电机控制系统等组成。能量管理系统的参数包括各蓄电池组的状态参数（如工作电压、放电电流和温度等）、车辆运行状态参数（如行驶速度、电机功率等）和车辆操纵状态（如制动、起动、加速和减速）等，能量管理系统具有对检测的状态参数进行实时显示的功能。能量管理系统对检测的状态参数按预定的算法进行推理与计算，并向蓄电池、电机等发出合适的控制和显示指令等，实现蓄电池能量的优化管理与控制。

纯电动汽车储能装置主要有蓄电池、燃料电池、超级电容和飞轮电池等。其中，蓄电池是纯电动汽车最常用的能量存储装置，也是目前制约纯电动汽车发展的关键因素。

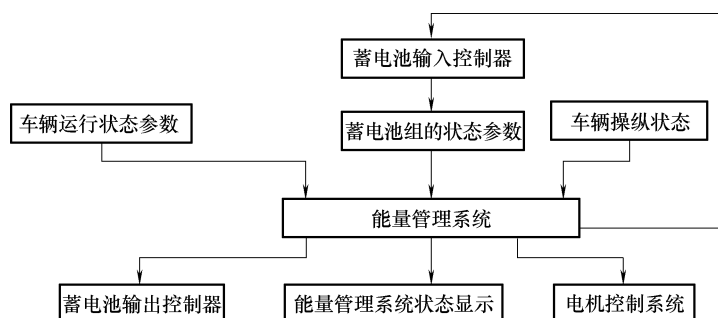


图 3-4-1 纯电动汽车能量管理系统

3.4.2 纯电动汽车充电装置

蓄电池充电装置是纯电动汽车不可缺少的系统之一，它的功能是将电网的电能转化为纯电动汽车车载蓄电池的电能。

(1) 纯电动汽车对充电装置的要求

纯电动汽车对充电装置的基本要求如下：

- 1) 安全性。纯电动汽车充电时，要确保人员的人身安全和蓄电池组的安全。
- 2) 使用方便。充电装置应具有较高的智能性，不需要操作人员过多干预充电过程。
- 3) 成本经济。成本经济、价格低廉的充电设备有助于降低纯电动汽车的整体成本，提高运行效益，促进纯电动汽车的商业化推广。
- 4) 效率高。高效率是对现代充电装置最重要的要求之一，充电效率高对纯电动汽车的整体能量效率具有重大影响。

5) 对供电电源污染小。采用电力电子技术的充电设备是一种高度非线性设备，会对供电电网及其他用电设备产生有害的谐波污染。此外，由于充电设备功率因数低，在充电系统负载增加时，对供电网的影响也不容忽视。

(2) 纯电动汽车充电装置的类型

纯电动汽车充电装置总体上可分为车载充电装置和非车载充电装置。

车载充电装置指安装在纯电动汽车上的、采用地面交流电网或车载电源对蓄电池组进行充电的装置，包括车载充电机、车载充电发电机组和运行能量回收充电装置。它将一根带插头的交流动力电缆线直接插到纯电动汽车的插座中给纯电动汽车充电。车载充电装置通常使用结构简单、控制方便的接触式充电器，也可是感应充电器。它完全按照车载蓄电池的种类进行设计，针对性较强。

非车载充电装置，即地面充电装置，主要包括专用充电机、专用充电站、通用充电机、公共场所用充电站等，它可满足各类蓄电池的多种充电方式。非车载充电器的功率、体积和质量通常都比较大，以便适应各种充电方式。

另外，根据纯电动汽车蓄电池充电时能量转换方式的不同，充电装置可分为接触式和感应式。

随着电力电子技术和变流控制技术的飞速发展，高精度可控变流技术的成熟和普及，分



阶段恒流充电模式已经基本被充电电流和充电电压连续变化的恒压限流充电模式取代。目前,主导充电工艺的还是恒压限流充电模式。接触式充电的最大问题在于安全性和通用性欠佳,为使它满足严格的安全充电标准要求,必须在电路上采用许多措施,使充电设备能在各种环境下安全充电。恒压限流充电和分阶段恒流充电均属于接触式充电技术。

(3) 纯电动汽车充电机的类型

充电机是纯电动汽车充电装置中最主要的设备,其性能直接影响纯电动汽车的充电效果。纯电动汽车充电机从供电电源提取能量,以合适的方式传输给蓄电池,建立供电电源与蓄电池之间的功率转换接口。

根据安装位置不同,可分为车载充电机和地面充电机;根据输入电源不同,可分为单相充电机和三相充电机;根据连接方式不同,可分为传导式充电机和感应式充电机;根据功能不同,可分为普通充电机和多功能充电机。

车载充电机安装在纯电动汽车上,通过插头和电缆与交流插座连接,因此也称交流充电机。车载充电机的优点是在蓄电池需要充电时,只要有可用的供电插座,就可进行充电。缺点是受车上空间的限制,因此功率处理能力有限,只能提供小电流慢速充电,充电时间较长。

地面充电机一般安装在固定的地点,已事先做好输入电源的连接工作,直流输出端与需要充电的纯电动汽车相连,因此也称直流充电机。地面充电机可提供多达上百千瓦的功率处理能力,可对纯电动汽车进行快速充电。

传导式充电机的输出直接连接到纯电动汽车上,两者之间存在实际物理连接,纯电动汽车上不装备电力电子电路。

感应式充电机利用电磁感应耦合方式向纯电动汽车传输电能,两者之间没有实际物理连接,充电机分为地面部分和车载部分。

普通充电机只提供对蓄电池的充电功能,多功能充电机除提供对蓄电池的充电功能外,还能实现对蓄电池进行容量测试、对电网进行谐波抑制、无功功率补偿和负载平衡等功能。当前实际运行的充电机基本上以交流电源作为输入电源。因此,充电机的功率转化单元实质上是一个 AC/DC 变换器。

目前,地面充电机使用的是传导式大功率三相充电机。

纯电动汽车充电机铭牌标志的电气参数和技术指标主要如下:

- 输入电源为 AC380V。
- 稳流精度为 1%。
- 稳压精度为 1%。
- 满载效率 >91%。
- 满载功率因数 >0.9。
- 使用环境温度为 $-20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。
- 最高输出电压为串联电池的个数 $\times$ 蓄电池充电限制电压 $\times k$ (k 为蓄电池厂家提供的控制参数)。
- 最低输出电压为串联电池的个数 $\times$ 蓄电池放电限制电压。
- 最大输出电流按蓄电池厂家提供数据确定。
- 最低充电电流按蓄电池厂家提供数据确定。



➤ 最大输出功率为最高输出电压 × 最大输出电流。

3.4.3 纯电动汽车的再生制动能量回收

再生制动指纯电动汽车在减速制动（或下坡）时将自身的部分动能转化为电能，转化的电能储存在储存装置中，如蓄电池、超级电容和超高速飞轮，最终增加纯电动汽车的续航里程。如果储能器已经被完全充满，则再生制动不能实现，所需的制动力只能由常规的制动系统提供。

与传统汽车相比，纯电动汽车工作在再生制动模式或电液复合制动模式时，可由电机提供一部分甚至全部制动力，在保证汽车制动安全性的同时，可回收一部分动能，储存在蓄电池中，以供再次利用。目前，绝大多数的纯电动汽车均采用前轴集中式电驱动。

在理想制动工况下，依据驾驶人踩制动踏板的动作和习惯，可将整个制动过程分为3个阶段：

- 第1阶段，驾驶人踩下制动踏板至理想位置。
- 第2阶段，驾驶人保持制动踏板位置直至停车。
- 第3阶段，驾驶人松开制动踏板。

在制动控制过程中，制动踏板的位移和制动主缸的压力决定了驾驶人的期望制动力。由以上分析可得出理想制动工况下的期望制动力曲线，如图3-4-2所示。

期望制动力越大，产生的制动强度越大，整个制动过程的制动功率就越大，对电机和蓄电池的要求也越高。在制动条件理想的情况下，可得到最大制动功率与制动初速度和制动强度的关系。有研究表明，在95%的制动工况下，汽车的最大制动功率小于150kW，这大大降低了对电机和蓄电池储能系统的性能要求，有利于制动能量的回收利用。

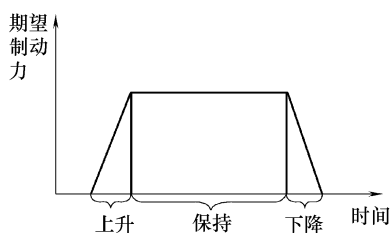


图3-4-2 期望制动力曲线

由再生制动时的能量流动路线可知，制动能量由车轮流至蓄电池，所流经的任何一个零部件都会使能量产生损失。但考虑到机械传动效率很高且稳定，影响制动能量回收的主要因素包括电机、蓄电池、液压制动系统3部分。

1) 电机。电机作为再生制动系统中能量形式转换的部件，对制动能量的回收起着至关重要的作用。电机的外特性决定了某一转速下再生制动力的最大值。电机的最大功率和基速决定了电机的功率特性。电机在基速以下时输出转矩保持恒定，功率与转速呈比例关系；电机在基速以上时，输出转矩随转速增加不断减小，功率输出保持恒定。当车速很低时，电机的转速也会随之变得很低，此时电机产生的感应电动势很低，不能为蓄电池继续充电。

2) 蓄电池。蓄电池是再生制动系统的储能部件，其性能和能量管理策略决定了蓄电池的工作状态，这主要体现在SOC和最大充电功率两个方面。每种蓄电池都对SOC的运行范围有固定的要求，超出范围的过充和过放都会对蓄电池造成不利影响。例如，锂电池SOC的运行范围一般为30%~70%，该段称为主动充电区域。当蓄电池的SOC大于70%时，再生制动系统不再为蓄电池充电。由于整个制动过程时间很短，蓄电池的SOC、温度和内阻可认为保持不变，因此蓄电池的开路电压保持不变。同时，为保护蓄电池，每个蓄电池单体都



有最大充电电流的限制。整个制动过程中，蓄电池可保持最大充电功率进行充电。电机的发电功率和蓄电池的充电功率共同限制了再生制动功率的大小，进一步限制了再生制动力的最大值。

3) 液压制动系统。由于电机再生制动的能力有限，同时考虑到电气系统容易出现故障，为保证制动的安全性，液压制动系统对纯电动汽车来说是必不可少的。但是再生制动力随车速不断变化，相应地，摩擦制动力也会随之改变，以保持与传统制动系统相同的制动强度。因此，液压制动系统结构上比传统制动系统增加了液压控制单元，以精确、稳定地控制制动轮缸的压力，保证汽车有良好的制动效能。液压控制单元对制动压力的控制能力间接影响到再生制动力的大小。

图 3-4-3 为纯电动汽车的再生制动/液压制动系统的基本结构，驾驶人踩下制动踏板后，电泵使制动液增压产生所需的制动力，制动控制与电机控制协同工作，确定纯电动汽车上的再生制动力矩和前后轮上的液压制动力。再生制动时，再生制动控制回收再生制动能量，且反充到动力电池中。与传统燃油车相同，纯电动汽车上的 ABS 及其控制阀的作用是产生最大制动力。

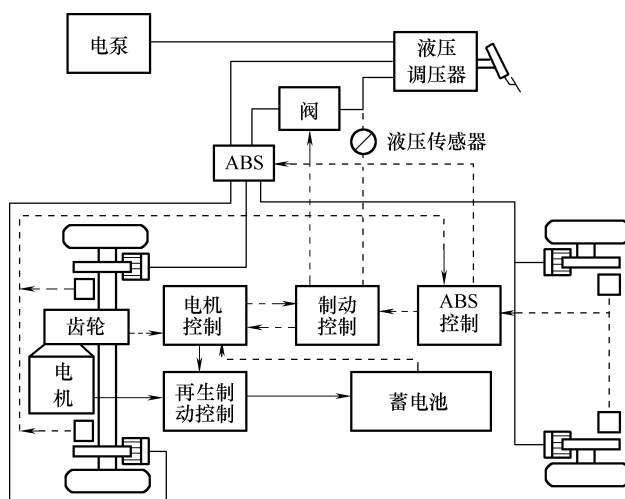


图 3-4-3 纯电动汽车再生制动/液压制动系统基本结构

再生制动能量回收的基本原理是先将汽车制动或减速时的一部分机械能（动能）经再生系统转换（或转移）为其他形式的能量（旋转动能、液压能、化学能等），并储存在储能器中，同时产生一定的负荷阻力使汽车减速制动。当汽车再次起动或加速时，再生系统又将储存在储能器中的能量转换为汽车行驶所需的动能（驱动力）。纯电动汽车再生制动能量回收的方法有飞轮储能、液压储能和电化学储能等。

飞轮储能是利用高速旋转的飞轮来储存和释放能量。汽车制动或减速时，先将汽车在制动或减速过程中的动能转换成飞轮高速旋转的动能。汽车再次起动或加速时，高速旋转的飞轮又将存储的动能通过传动装置转化为汽车行驶的驱动力。

液压储能式再生制动能量回收是先将汽车在制动或减速过程中的动能转换成液压能，并将液压能储存在液压储能器中。汽车再次起动或加速时，储能系统又将储能器中的液压能以



机械能的形式反作用于汽车，以增加汽车的驱动力。

电化学储能式再生制动能量回收是先将汽车在制动或减速过程中的动能，通过发电机转化为电能并以化学能的形式储存在储能器中。汽车再次起动或加速时，再将储能器中的化学能通过电动机转化为汽车行驶的动能。储能器可采用蓄电池或超级电容，由发电机/电动机实现机械能和电能之间的转换。系统还包括一个控制单元，用来控制蓄电池或超级电容的充放电状态，并保证蓄电池的剩余电量在规定范围内。

目前，纯电动汽车一般采用电化学储能方法实现再生制动能量回收，采用的办法是在制动或减速时将驱动电机转化为发电机。

图3-4-4是一种用于前轮驱动汽车的电化学储能式再生制动能量回收系统。当汽车以恒定速度或加速度行驶时，电磁离合器脱开。当汽车制动时，行车制动系统开始工作，汽车减速制动，电磁离合器接合，从而接通驱动轴和变速器的输出轴。这样，汽车的动能由输出轴、离合器、驱动轴、驱动轮和从动轮传到发动机和飞轮上。制动时的机械能由电动机转换为电能，储存入蓄电池。当离合器再次分离时，传到飞轮上的制动能，驱动发电机产生电能，储存入蓄电池。

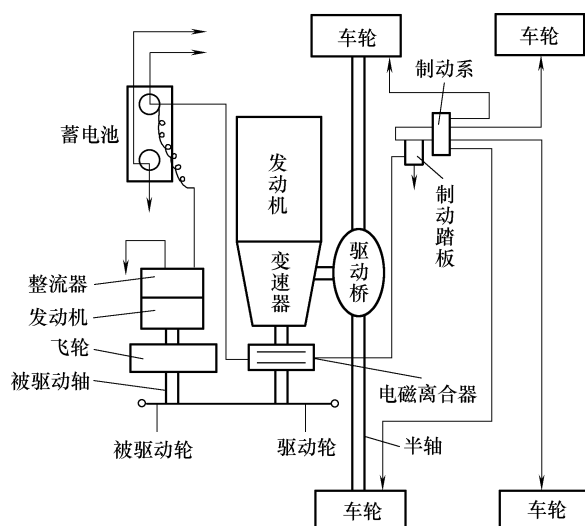


图 3-4-4 电化学储能式再生制动能量回收系统

在发电机和飞轮回收能量时，产生负载作用，作为前轮驱动的制动力。当汽车再次起动时，蓄电池的化学能被转换成机械能，以加速汽车。



燃料电池汽车

燃料电池 (Fuel Cell) 是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的化学电池, 它直接把物质发生电化学反应时释放出的电子转化为电能。燃料电池的开发历史相当悠久。早在 1839 年, 英国人格罗夫就提出了氢和氧反应发电的原理。格罗夫通过将水的电解过程逆转发现了燃料电池的原理。他用铂作电极, 以氢为燃料, 氧为氧化剂, 从氢气和氧气中获取电能, 自此拉开了燃料电池发展的序幕。20 世纪 50 年代, 培根成功开发了多孔镍电极, 并制备了 5kW 碱性燃料电池系统, 这是第一个实用性燃料电池。20 世纪 60 年代, 液氢和液氧发电的燃料电池诞生, 由美国 UTC 公司首先用于航天和军事领域。20 世纪 90 年代, 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 采用立体化电极和薄质子交换膜后, 技术取得一系列突破性进展, 极大地加快了燃料电池的实用化进程。各大跨国汽车公司纷纷投入巨资, 研发出各种类型的燃料电池汽车 (FCEV)。

近年来, 燃料电池在研究、开发和商品化方面取得了巨大突破, 这给汽车工业和能源工业的变革带来了新希望。美国能源部的报告指出, 燃料电池技术将成为 21 世纪汽车工业竞争的焦点。发达国家都将大型燃料电池的开发作为重点研究项目, 企业界也纷纷斥以巨资, 从事燃料电池技术的研究与开发, 现在已取得许多重要成果。2MW、4.5MW、11MW 成套燃料电池发电设备已进入商业化生产阶段, 各等级的燃料电池发电厂相继在一些发达国家建成。21 世纪, 燃料电池发电有望成为继火电、水电、核电后的第四代发电技术。

4.1 燃料电池汽车的类型与结构原理

4.1.1 燃料电池汽车的类型

采用燃料电池作为电源的纯电动汽车称为燃料电池汽车 (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)。燃料电池汽车一般以质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 作为车载能量源。

燃料电池汽车按燃料特点可分为直接燃料电池汽车和重整燃料电池汽车。直接燃料电池汽车的燃料主要是氢气。直接燃料电池汽车排放无污染, 被认为是最理想的汽车, 但存在氢的制取和存储困难等缺点。重整燃料电池汽车的燃料主要有汽油、天然气、甲醇、甲烷、液化石油气等, 其结构比直接燃料电池汽车复杂得多。

燃料电池汽车按燃料氢的存储方式可分为压缩氢燃料电池汽车、液氢燃料电池汽车和合金 (碳纳米管) 吸附氢燃料电池汽车。

燃料电池汽车按“多电源”的配置不同, 可分为纯燃料电池驱动 (PFC) 的燃料电池汽车、燃料电池与辅助蓄电池联合驱动 (FC + B) 的燃料电池汽车、燃料电池与超级电容联



合驱动（FC + C）的燃料电池汽车，以及燃料电池与辅助蓄电池和超级电容联合驱动（FC + B + C）的燃料电池汽车。

（1）纯燃料电池驱动（PFC）的燃料电池汽车

纯燃料电池驱动的汽车只有燃料电池一个动力源，汽车的所有功率负荷都由燃料电池承担。纯燃料电池驱动的汽车的动力系统如图 4-1-1 所示。

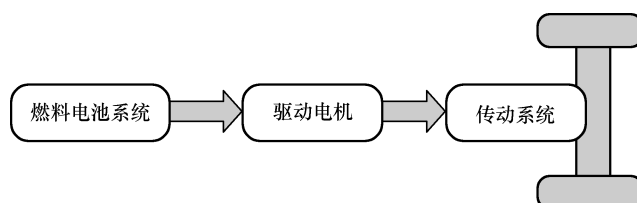


图 4-1-1 纯燃料电池驱动动力系统结构

纯燃料电池驱动系统将氢气与氧气反应产生的电能通过总线传输给驱动电机，驱动电机将电能转化为机械能再传输给传动系统，从而驱动汽车行驶。

这种系统的优点在于：

- 1) 结构简单，系统控制和整体布置容易。
- 2) 系统部件少，有利于整车的轻量化。
- 3) 整体的能量传递效率高，从而提高了整车的燃料经济性。

存在的问题有：

- 1) 燃料电池功率小、成本高。
- 2) 对燃料电池系统的动态性能和可靠性要求很高。
- 3) 不能进行制动能量回收。

因此，为有效解决上述问题，必须以辅助能量存储系统作为燃料电池系统的辅助动力源，与燃料电池联合工作，组成混合驱动系统，共同驱动汽车。从本质上讲，这种结构的燃料电池汽车采用的是混合动力结构。它与传统意义上的混合动力结构的差别仅在于用燃料电池取代了内燃机。在燃料电池混合动力汽车中，燃料电池和辅助能量存储装置共同向电机提供电能，通过变速机构来驱动汽车。

（2）燃料电池与辅助蓄电池联合驱动（FC + B）的燃料电池汽车

燃料电池与辅助蓄电池联合驱动的燃料电池汽车的动力系统如图 4-1-2 所示。这是一个典型的串联式混合动力结构。在该动力系统结构中，燃料电池和蓄电池一起为驱动电机提供能量，驱动电机将电能转化成机械能传输给传动系统，从而驱动汽车行驶。在汽车制动时，驱动电机进入发电机模式，蓄电池将储存回馈的能量。在燃料电池和蓄电池联合供能时，燃料电池的能量输出变化较平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的高频部分由蓄电池分担。

这种结构的优点在于：

- 1) 由于增加了比燃料电池价格低廉得多的蓄电池组，系统对燃料电池的功率要求较纯燃料电池结构有很大降低，从而大大降低了整车成本。
- 2) 燃料电池可在较好的设定工作条件下工作，工作时燃料电池的效率较高。

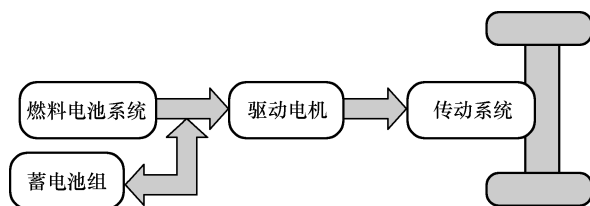


图 4-1-2 燃料电池与辅助蓄电池形式动力系统结构

- 3) 系统对燃料电池的动态响应性能要求较低。
 - 4) 汽车的冷起动性能较好。
 - 5) 制动能量回馈系统可回收汽车制动时的部分动能，进而增加整车的能量效率。
- 存在的问题有：

- 1) 由于蓄电池的使用，使整车重量增加，动力性能和经济性受到影响。
- 2) 蓄电池充放电过程会有能量损耗。
- 3) 系统度、系统控制和整体布置难度增加。

(3) 燃料电池与超级电容联合驱动（FC + C）的燃料电池汽车

燃料电池 + 超级电容的结构与燃料电池 + 蓄电池的结构相似，只是把蓄电池换成超级电容，如图 4-1-3 所示。相对于蓄电池，超级电容充放电效率高、能量损失小、功率密度大，在回收制动能量方面比蓄电池有优势，循环寿命长，但其能量密度较小。随着超级电容技术的不断进步，这种结构将成为重要研究方向之一。

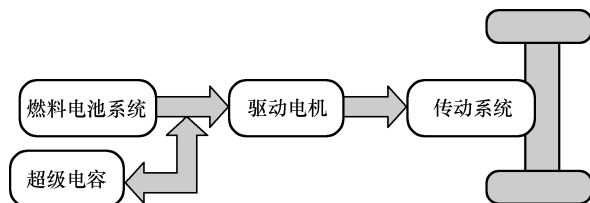


图 4-1-3 燃料电池 + 超级电容形式动力系统结构

(4) 燃料电池与辅助蓄电池和超级电容联合驱动（FC + B + C）的燃料电池汽车

燃料电池与蓄电池和超级电容联合驱动的汽车的动力系统如图 4-1-4 所示，该结构也为串联式混合动力结构。在该动力系统结构中，燃料电池、蓄电池和超级电容一起为驱动电机提供能量，驱动电机将电能转化成机械能传输给传动系统，从而驱动汽车行驶。在汽车制动时，驱动电机进入发电机模式，蓄电池和超级电容会储存回馈的能量。

在燃料电池、蓄电池和超级电容联合供能时，燃料电池的能量输出较平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的低频部分由蓄电池承担，能量需求变化的高频部分由超级电容承担。在这种结构中，各动力源的分工更加明细，因此它们的优势也得到更好的发挥。

这种结构的优点在于：相比燃料电池 + 蓄电池的结构形式，在部件效率、动态特性、制动能量回馈等方面性能更为优越。

这种结构的缺点也更加明显，由于增加了超级电容，整车重量增加。同时，系统更加复

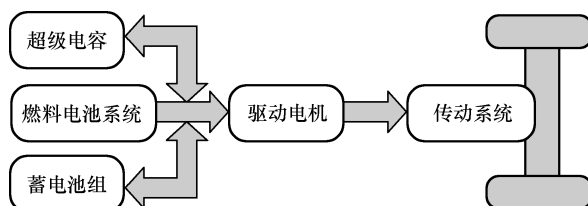


图 4-1-4 燃料电池 + 蓄电池 + 超级电容形式动力系统结构

杂化，系统控制和整体布置的难度也随之增大。

总的来说，如果能对系统进行很好的匹配和优化，这种结构带来的良好性能具有很大的吸引力。

在 3 种混合驱动结构中，FC + B + C 组合被认为能最大限度满足整车的起动、加速、制动力和效率需求，但成本最高，结构和控制也最复杂。目前燃料电池汽车动力系统的一般结构是 FC + B 组合，这是因为它具有以下特点：

- 1) 燃料电池单独或与蓄电池共同提供持续功率，且在车辆起动、爬坡和加速等峰值功率需求时，蓄电池提供峰值功率。
- 2) 在车辆起步时和功率需求不大时，燃料电池可单独输出能量。
- 3) 蓄电池技术比较成熟，可在一定程度上弥补燃料电池技术上的不足。

目前，FC + B 混合驱动系统主要有燃料电池直接混合系统和动力电池直接混合系统两种结构形式。

燃料电池直接混合系统中的燃料电池直接接入直流母线，因此驱动系统的电压必须设计在燃料电池可调节的范围内。由于蓄电池需要向驱动系统传输能量，并从燃料电池与车辆系统取得能量，需安装双向 DC/DC 变换器，且必须有响应速度快的特点。燃料电池和蓄电池之间的功率平衡由 DC/DC 变换器和燃料电池管理系统共同实现。该结构形式对于燃料电池的输出电压达到了最优化设计。但是对燃料电池的要求比较高，同时 DC/DC 变换器要实现双向快速控制，双向 DC/DC 变换器的成本较高，整个系统的控制也比较复杂。

动力电池直接混合系统中，DC/DC 变换器将燃料电池的输出电压和系统电压分开。

驱动系统电压可设计得比较高，这样可降低驱动系统的电流值，有利于延长各电器元件的寿命，同时高系统电压可充分满足动力电池的需要。DC/DC 变换器还负责保持燃料电池和蓄电池之间的功率平衡。

但是燃料电池的能量输出需要通过 DC/DC 变换器才能进入直流母线，因此导致系统的效率比较低，特别是对于连续负载来说不是最优化设计。例如，匀速工况下，系统功率需求较小，由燃料电池单独提供车辆行驶所需的功率。两种结构形式的主要差别在于 DC/DC 变换器的使用方式。DC/DC 变换器的位置和结构决定了动力系统的构型。DC/DC 变换器的位置主要取决于电机及其控制器特性和燃料电池特性，另一个重要因素则是混合度。

4.1.2 燃料电池汽车的结构原理

目前燃料电池汽车绝大多数采用的是混合式燃料电池驱动系统，将燃料电池与辅助动力源相结合，燃料电池可只满足持续功率需求，借助辅助动力源提供加速、爬坡等所需的峰值



功率，且在制动时可将回馈的能量存储在辅助动力源中。混合式燃料电池驱动系统有并联式和串联式两种，如图 4-1-5 所示。

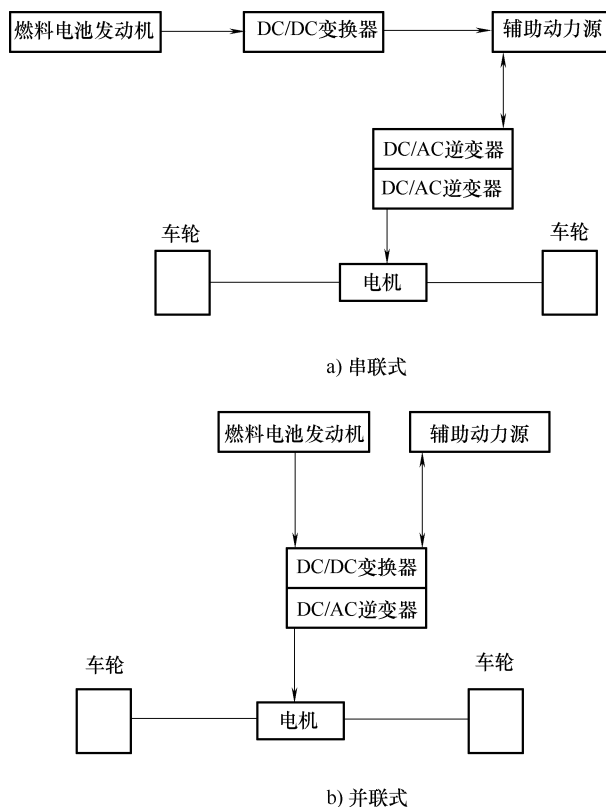


图 4-1-5 混合式燃料电池汽车驱动系统框图

混合式燃料电池汽车的动力系统主要由燃料电池发动机、辅助动力源、DC/DC 变换器、DC/AC 逆变器、电动机和动力电控系统等组成。

(1) 燃料电池发动机

在燃料电池汽车所采用的燃料电池发动机中，为保证质子交换膜燃料电池组的正常工作，除以质子交换膜燃料电池组为核心外，还装有氢气供给系统、氧气供给系统、气体加湿系统、反应生成物处理系统、冷却系统和电能转换系统等。只有这些辅助系统匹配恰当和正常运转，才能保证燃料电池发动机正常运转。

1) 氢气供应、管理和回收系统。气态氢的储存装置通常是高压储气瓶，对高压储气瓶的品质要求很高，为保证燃料电池汽车一次充气有足够的行驶里程，就需要多个高压储气瓶来储存气态氢气。一般轿车需要 2~4 个高压储气瓶，大客车上需要 5~10 个高压储气瓶。液态氢气虽然比能量高于气态氢，但其处于高压状态，不仅需要用高压储气瓶储存，还要用复杂的低温保温装置来保持低温。

在使用不同压力的氢气（高压气态氢气和高压低温液态氢气）时，需要用不同的氢气储存容器，不同的减压阀、调压阀、安全阀、压力表、流量计、热交换器和传感器等来进行控制，并对各种管道、阀和仪表等的接头采取严格的防泄漏措施。从燃料电池中排出的水，



含有未发生反应的少量氢气。正常情况下，从燃料电池排出的少量氢气应低于1%，应用氢气循环泵将这些氢气回收。

2) 氧气供应和管理系统。氧气可从空气中获取或从氧气罐中获取。使用空气时需要用压缩机来提高其压力，以增加燃料电池的反应速度。在燃料电池系统中，配套压缩机的性能有特定要求，压缩机质量和体积会增加燃料电池发动机系统的质量、体积和成本，压缩机所消耗的功率会使燃料电池的效率降低。空气供应系统的各种阀、压力表、流量表等的接头要采取防泄漏措施。在空气供应系统中还要对空气进行加湿处理，保证空气有一定的湿度。

3) 水循环系统。燃料电池发动机在反应过程中会产生水和热量，在水循环系统中用冷凝器、气水分离器和水泵等对反应生成的水和热量进行处理。其中一部分水可用于空气的加湿。另外还需要一套冷却系统，以保证燃料电池的正常运作。

4) 电力管理系统。燃料电池输出的是直流电。需要经过DC/DC变换器进行调压，在采用交流电动机的驱动系统中，还需要用逆变器将直流电转换为三相交流电。

以氢气为燃料的燃料电池发动机的各种外围装置的体积和质量，约占燃料电池发动机总体积和总质量的 $1/3 \sim 1/2$ 。

(2) 辅助动力源

在FCEV上，燃料电池发动机是主要电源，另外还配备有辅助动力源。根据FCEV的设计方案不同，所采用的辅助动力源也不尽相同，可用蓄电池组、飞轮储能器或超大容量电容器等共同组成双电源系统。

在具有双电源系统的FCEV上，驱动电机的电源可出现以下驱动模式：

1) 在FCEV启动时，由辅助动力源提供电能带动燃料电池发动机启动，或带动车辆起步。

2) 车辆行驶时，由燃料电池发动机提供驱动所需全部电能，剩余的电能储存到辅助动力源中。

3) 在加速和爬坡时，若燃料电池发动机提供的电能还不能满足FCEV驱动功率要求，则由辅助动力源提供额外电能，使驱动电动机的功率或转矩达到最大，形成燃料电池发动机与辅助动力源同时供电的双电源供电模式。

4) 储存制动时反馈的电能，并向车辆的各种电子、电器设备提供电能。

由于燃料电池发动机的比功率和比能量在不断改进和提高，现代燃料电池汽车正逐步向加大燃料电池发动机功率的方向发展，可由燃料电池发动机提供驱动所需全部电能。

此外，采用42V蓄电池来储存制动时反馈的电能，并为车载电子电器系统提供电能，可取消用于辅助驱动的动力电池组，减轻辅助电池组和整车的质量。

(3) DC/DC变换器

FCEV采用的不同电源有各自的特性，燃料电池只提供直流电，其电压和电流随输出电流的变化而变化。燃料电池不可能接受外电源的充电，电流是单向的。燃料电池汽车采用的辅助电源（蓄电池和超级电容）在充电和放电时，也是直流电的形式，但电流的方向是可逆的。FCEV上的各种电源的电压和电流受工况变化的影响，呈不稳定状态。

为满足驱动电机对电压和电流的要求，及对多电源电力系统的控制，在电源与驱动电机之间，用计算机控制实现对燃料电池汽车的多电源综合控制，保证燃料电池汽车的正常运行。燃料电池汽车的燃料电池需要装备单向DC/DC变换器，蓄电池和超级电容需要装备双向DC/DC变换器。



燃料电池轿车中, DC/DC 变换器的主要功能概括起来包括以下 3 项:

1) 调节燃料电池的输出电压。由于燃料电池的输出特性较软, 输出电压随负载变化而变化, 轻载时输出电压偏高, 重载时输出电压偏低, 难以满足驱动电机控制器的需求, 因此借助 DC/DC 变换器对燃料电池的输出电压进行调节。

2) 调节整车能量分配。燃料电池汽车也属于混合动力汽车, 具有燃料电池和蓄电池两种能源, 控制燃料电池的输出能量就可控制整车能量的分配。如果燃料电池的输出能量不足以驱动电机, 缺口能量就由蓄电池来补充。当燃料电池输出的能量超出电机的需求时, 多余的能量可进入蓄电池中, 补充蓄电池的能量。DC/DC 变换器用于控制燃料电池的能量输出。

3) 稳定整车直流母线电压。燃料电池的输出电压经过 DC/DC 变换器后能稳定整车直流母线电压。

DC/DC 变换器在燃料电池汽车中起着重要的作用, 它的性能必须满足以下要求:

1) 变换器是能量传输部件, 因此需要高转换效率, 以提高能源利用率。
2) 为降低对燃料电池的输出电压要求, 变换器应具有升压功能。
3) 由于燃料电池的输出不稳定, 需要变换器闭环运行进行稳压, 为给驱动器稳定的输入, 需要变换器有较好的动态调节能力。

4) 体积小、重量轻。

(4) 驱动电机

燃料电池汽车用的驱动电机主要有直流电机、交流电机、永磁电机和开关磁阻电机等。燃料电池汽车驱动电机的选型必须结合整车开发目标, 综合考虑电机的特点。

(5) 动力电控系统

燃料电池汽车的动力电控系统主要由燃料电池发动机管理系统、蓄电池管理系统、动力控制系统及整车控制系统组成。

1) 发动机管理系统。燃料电池发动机管理系统按整车控制器的功率设定值控制燃料电池发动机的功率输出, 监测发动机的工作状态, 保证发动机稳定可靠地运行时还可进行故障诊断及管理。其具体组成包括供氢系统、供氧系统、水循环及冷却系统。

2) 蓄电池管理系统。蓄电池管理系统分上下两级。下级 LECU 负责蓄电池组电压、温度等物理参数的测量, 进行过充、过放保护及组内、组间均衡。上级 CECU 负责蓄电池组的电流检测及 SOC 估算, 以及相关的故障诊断, 同时运行高压漏电保护策略。

3) 动力控制系统。动力控制系统包含 DC/DC 变换器、DC/AC 逆变器、DCL 和空调控制器及空调压缩机变频器, 以及电机冷却系统控制器。DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器的作用如前所述, DCL 负责将高压电源转换为系统零部件所需的 12V/24V 低压电源, 电机冷却系统控制器负责电机及 PCU 的水冷却系统控制。

4) 整车控制系统。整车控制系统的核心是多能源控制策略 (包括制动能量回馈功能), 它一方面接收来自驾驶人的需求信息 (如点火开关、节气门踏板、制动踏板、变速信息等), 实现整车工况控制; 另一方面基于反馈的实际工况 (如车速、制动、电机转速等) 以及动力系统的状况 (燃料电池及蓄电池的电压、电流等), 根据预先匹配好的多能源控制策略进行能量分配调节控制。整车的故障诊断及管理也由它负责。

上述各系统都通过高速 CAN-Bus 进行信息交换。在上述基本动力系统架构基础上, 可根据混合度的不同, 把燃料电池混合动力汽车分为电量消耗型和电量维持型。混合度指燃料



电池额定输出功率与驱动电机额定功率之比。前者的混合度较低，蓄电池是主要能量源，燃料电池只作为里程延长器来使用；后者的混合度较高，在行驶过程中蓄电池的 SOC 基本保持在一个合理的范围，目前国外大部分国家及我国全部采用该方案。

4.2 燃料电池汽车电驱动系统及控制策略

典型的燃料电池混合动力汽车驱动系统构造，如图 4-2-1 所示。其主要由作基本电源用的燃料电池系统、峰值电源（PPS）、电机驱动装置、车辆控制器和燃料电池系统与峰值电源之间的电子接口设备组成。

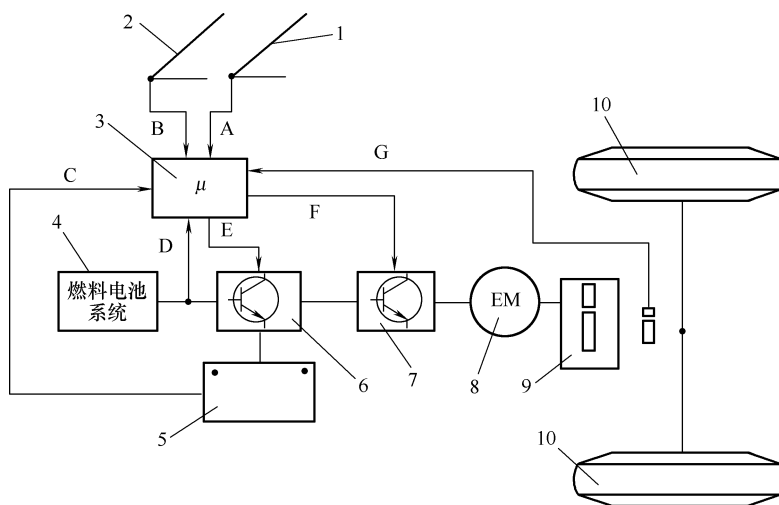


图 4-2-1 典型燃料电池混合动力驱动系的结构

- 1—加速踏板 2—制动踏板 3—车辆控制器 4—燃料电池系统 5—峰值电源 6—电子接口设备
7—电机控制器 8—电机 9—传动装置 10—车轮
A—牵引指令信号 B—制动指令信号 C—峰值电源的能量信号 D—燃料电池功率信号
E—电子接口设备的控制信号 F—电机控制信号 G—转速

在车辆控制器中预置的控制策略，控制燃料电池系统、峰值电源和驱动系统之间的功率流，它应确保以下功能：

- 1) 电机的输出功率始终满足功率要求。
- 2) 峰值电源的能级始终维持在最佳范围。
- 3) 燃料电池系统运行在最佳运行区。

由驾驶人通过加速踏板或制动踏板给出的驱动指令或制动指令，对整车进行控制。

其工作分为停顿模式、制动模式和驱动模式：

1) 停顿模式。燃料电池系统和峰值电源都不向驱动系供给功率，燃料电池系统可运行在空载状态。

2) 制动模式。燃料电池系统可运行在空载状态，而峰值电源依据制动系统运行特性，吸收再生制动能量。



3) 驱动模式。若电机输入功率大于燃料电池系统的额定功率,则应用混合驱动模式,燃料电池系统运行在额定功率状态。若电机输入功率小于燃料电池系统的额定功率,则由燃料电池系统供电,同时根据情况可给峰值电源充电。若电机输入功率小于燃料电池系统的额定功率,且燃料电池不需要充电,则根据情况可由燃料电池单独供电或由峰值电源单独供电。

混合动力有轨电车技术



5.1 概述

5.1.1 国内外混合动力轨道车辆

在新能源技术应用方面，目前国外轨道交通车辆采用的地面供电技术有 APS（地面受流，Alstom 公司）、TRAMWAVE（地面受流，Ansaldo 公司）、PRIMOVE（感应受电技术，Bombardier 公司）等，这些技术受天气影响较大，且线路成本较高。而近年发展最快的是由供电电网和动力电池、超级电容联合供电的混合动力有轨电车，在技术研究和产品、市场开发方面，做得最好的是欧洲诸国和日本。其中，德国、法国、日本、西班牙等国已完全掌握电网 + 超级电容（动力电池）、电网 + 动力电池 + 超级电容、内燃机 + 超级电容（动力电池）等多种混合动力技术及产品开发技术。目前，国际各大公司都有相关的产品研发项目，如庞巴迪的 MITRAC 项目（采用超级电容的节能装置）、西门子的 Sitras-HES 项目、CAF 公司 ACR 项目等。

早在 20 世纪初，德国便已将以蓄电池为动力源的电力机车（电力火车）投入长途工作的人员和货物运输领域。到 1979 年，大约 20% 的德国长途轨道车辆为电力机车拖动，这些车辆由沿途的 100 个充电站提供能源。车上使用的是 VARTA AG 公司制造的铅酸蓄电池。每列机车的蓄电池系统由 220 块蓄电池单体组成，重 21t，存储能量 $650\text{kW} \cdot \text{h}$ ，单日运行 250 ~ 400km。蓄电池的平均寿命为 4 年。根据德国的实践经验，电力机车的优点包括可靠性高、噪声低、无污染、使用成本低、便于操作和维修等。

以蓄电池为动力源的电力机车多年来也广泛应用于采矿业中的矿石运输。由于采矿环境的潜在危险比较大，可能存在各种易燃、易爆的气体，同时在封闭矿井或作业空间内应用，内燃机车容易造成严重的空气污染，不利于作业。为保证矿用机车的安全性，各国都制定了严格的法规甚至法律，以保证电力机车蓄电池及电气辅助设备（如充电器）达到防爆、防火要求。

近年来，随着超级电容和蓄电池技术的飞速发展，世界各国都加紧了对混合动力有轨电车的开发工作。2002 年，美国 Vehicle Projects LLC 公司和 Fuel Cell Propulsion 协会联合开发了世界第一辆燃料电池动力拖运机车，清洁、节能、低噪声、高安全性是这辆燃料电池动力拖运机车的最大特点。该车在原型机（铅酸电池作动力源）的基础上改造完成，采用两个质子交换膜燃料电池堆串联组成动力源，同时装备有增湿器和热交换器等设备，并附加其他电能存储设备作为驱动电源。储氢系统的容量可使该车在 14kW 的功率下连续运行 8h。



为降低环境负担并提高列车性能，从 2000 年起，东日本铁路公司的研发中心一直致力于进行新能源（New Energy, NE）列车的开发，以减少铁路动车对环境的负面影响。自 2003 年起进行柴油机混合式列车的开发，确立了实用化目标。2006 年开始实施 NE 列车的第 2 步计划，即开发世界首创的燃料电池混合式铁道列车。

2007 年 7 月 31 日，东日本铁路公司正式将混合动力有轨电车 Kiha E200 投入运营，运行路线为日本本州中部长野县山地度假区的一条山地短途路线。这也是世界上首列用于商业运营的混合动力火车。这一混合动力火车能将能源效率提高 20%，同时将二氧化碳排放率降低近 60%。列车配有一台柴油发动机，每节车厢下分别装两台电动机，车厢顶层有多个锂电池。上山坡或电动机的电力不足时，起动柴油发动机。火车减速时，柴油发动机会渐渐停止工作，因惯性作用产生的动能正好可用来为蓄电池充电，从而达到降低能量消耗的目的。混合动力有轨电车还为司机配备了触碰式控制面板。司机可在驾驶过程中，通过面板上指针所显示的能量流动方向，及时在柴油发动机、发电机、电动机和蓄电池间组合切换，使能量达到平衡。

以下简要介绍欧洲诸国的典型混合动力有轨电车技术。

1) 庞巴迪的 MITRAC 项目。庞巴迪的 MITRAC 车如图 5-1-1 所示。MITRAC 每个单元重 450kg，长 1900mm、宽 950mm、高 455mm。充足电时容量为 300kW·h，可利用的能量为 60%，装置总重为 477kg。该车能以 26km/h 的速度离开架空线行驶 500m。40m 长的有轨电车配备 3 套装置。

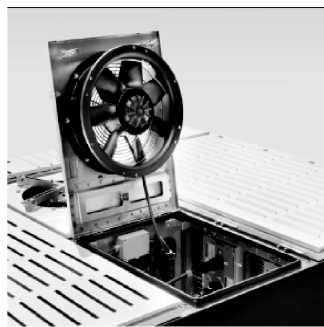


图 5-1-1 MITRAC 车辆

2) 西门子 Sitras-HES 系统。Sitras-HES 系统由 2 个储能装置组成，如图 5-1-2 所示。由 DC 750V 充电的超级电容另外增加一组驱动蓄电池，形成类似混合动力的方式。



电容箱



蓄电池箱

图 5-1-2 西门子 Sitras-HES 电容箱、蓄电池箱

西门子 Sitras-HES 参数见表 5-1-1。西门子 Sitras-HES 采用空气冷却 Maxwell 0.85kW·h 超级电容，工作电压为 DC 190 ~ 480V，组成 2 套 144kW 的装置，总重 820kg。蓄电池为水



冷式 SAFT NiMH，容量为 $18\text{kW} \cdot \text{h}$ ，输出功率为 105kW ，重 826kg 。所有设备重约 2.2t ，且具备功能可扩展性。试验结果表明，在正常制动情况下，再生的电能有 $1/3$ 反馈到架空线， $1/3$ 被超级电容吸收， $1/3$ 用于车上的辅助设备，或消耗在制动电阻器。如果将超级电容的容量增加 1 倍，则可消除制动电阻器的损耗。储能装置充满电后，正常线路条件下车辆可独立行驶 2.5km ，正常充电时间仅为 20s 。

表 5-1-1 西门子 Sitras-HES 参数

参 数	蓄电池参数	电 容 参 数
所选产品	Maxwell	NiMH (SAFT)
容量	$0.85\text{kW} \cdot \text{h}$	$18\text{kW} \cdot \text{h}$
最大功率	$2 \times 144\text{kW}$	105kW
电压范围	$190 \sim 480\text{V}$	$400 \sim 528\text{V}$
冷却方式	强迫风冷	水冷
尺寸	$2000\text{mm} \times 1520\text{mm} \times 630\text{mm}$	$1670\text{mm} \times 1025\text{mm} \times 517\text{mm}$
重量	820kg	826kg

3) CAF 公司 ACR 有轨电车。CAF 公司的 ACR (Rapid Charge Accumulator) 有轨电车配备了 2 个混合动力模块，可实现全程无接触网供电运行，如图 5-1-3 所示。该车于 2011 年 11 月在萨拉戈萨 (zaragasa) 正式运营 (整条线路设两段无网区)，至今运转良好。

ACR 有轨电车混合动力系统的技术参数见表 5-1-2。ACR 系统能实现 1000m 无供电区运行，在辅助用电系统工作的情况下可保证 500m 运行距离。

超级电容只需在车辆停靠站充电 30s 即可全部充满。超级电容失效时，配备的镍氢蓄电池可充当备用电源。系统可实现再生制动能量回收。



图 5-1-3 CAF 公司的 ACR 有轨电车

表 5-1-2 ACR 有轨电车混合动力系统的技术参数

额定功率	226kW
最大功率	400kW
能量	18.1kW (最多 5 个独立蓄电池或电容的支路串并联)
电容每个支路	$0.775\text{kW} \cdot \text{h}$ (正常)/ $1\text{kW} \cdot \text{h}$ (总)
蓄电池每个支路	$15\text{kW} \cdot \text{h}$
电压 (额定/运行)	$750\text{V}/500\text{V} \sim 900\text{V}$
ACR 箱子尺寸	不大于 $2455\text{mm} \times 1600\text{mm} \times 750\text{mm}$
ACR 箱子重量	



(续)

1 个支路	800kg
2 个支路	1150kg
3 个支路	1500kg
4 个支路	1850kg
5 个支路	2200kg
工作温度	-25 ~ 50℃
冷却	强迫风冷
通信接口	
车辆网络	TCN- MVB
维修网络	Ethernet

4) Alstom 公司的 STEEM 系统。Alstom 公司开发的 STEEM (Maximal Energy Efficiency Tramway System) 应用在法国巴黎 T3 线 Citadis 有轨电车上。车顶安装的 1.4t 超级电容由 48 个模块组成。通过接触网、地面充电站充电 20s, 在载有 300 位乘客的情况下可行驶 300m, 速度可达 23km/h。该超级电容模块可实现再生制动能量回收, 充电容量达到设计容量的 30%, 车辆就能行驶到下一站。

国外开展混合动力轨道车辆研究工作的公司的技术研究现状见表 5-1-3。

表 5-1-3 各大公司的技术研究现状

代表产品	CAF	Alstom	川崎重工		西门子	庞巴迪	福斯罗
	ACR	STEEM	SWIMO 有轨电车	新能源列车	Avenio	Primove 系统	Vossloh
混动储能装置	高速充电 超级电容, 以及 ACR 系统	高速充电 超级电容	镍氢电池	燃料电池	双层电容器和驱动 电池	无接触网 应用技术-超 级电容储能	油电混合 动力
开始运行时间	2010 年	2010 年	2007 年	2007 年	2015 年	2010 年	2014 年

国内开展轨道交通行业混合动力技术研究工作的单位主要有长客 (与福伊特合作)、四方 (与斯柯达合作)、浦镇 (与庞巴迪合作)、株洲 (与西门子合作)、大连 (与安萨尔多合作)、中车唐山机车车辆有限公司等。

目前国内已成功研制出超级电容供电的有轨电车。株洲于 2012 年推出超级电容车, 长客的超级电容车于 2013 年在沈阳浑南线投入使用。这种超级电容车站间距不能超过 2km, 需要停站时充满电方可继续运行。唐车公司研制的动力电池 + 超级电容混合动力车在此基础上更进一步, 引入能量更高的动力电池, 车辆可在长于 5km 的平直道上持续运行, 仅需在站点处架设电网或设置充电站。国内市场方面, 广州、沈阳、淮安、南京、深圳等多地分别采用了超级电容有轨电车和动力电池有轨电车。

在混合动力机车方面, 中车资阳机车有限公司于 2008 年研制了 CKD6E5000 型混合动力交流传动内燃调车机车。该车由柴油机驱动主发电机发电, 用产生的能量驱动电动机, 同时给蓄电池组充电。由蓄电池组在发电机停止工作时提供能量。此外, 株洲电力机车厂进行了



地铁电动工程车的研究，第三轨有电时，由第三轨受流对工程车进行驱动，同时给车辆上的蓄电池充电，当第三轨无电时，由蓄电池驱动工程车辆。

5.1.2 混合动力轨道车辆技术分析

(1) 混合动力轨道车辆用超级电容和蓄电池优缺点

综合近年国内外混合动力轨道车辆采用的超级电容和蓄电池的应用情况，总结出的超级电容和蓄电池优缺点见表 5-1-4。

表 5-1-4 超级电容和蓄电池应用于混合动力轨道车辆的优缺点

	优 点	缺 点
蓄 电 池	1) 维修性好，蓄电池进行了模块化封装，利于维修人员进行更换 2) 采用蓄电池的车辆密封性好，采用蓄电池驱动，免掉了与外界连接的高压结构，因此整车的密封和防水性能更高 3) 噪声低，舒适度高，避免了高压设备的高频率开关，蓄电池充放电无噪声，因此系统舒适度更高 4) 节省接触网、支撑杆等基础设施建设等，节省费用，同时利于美化城市环境	1) 功率密度低，同样容量的蓄电池需要空间大 2) 在低温和高温情况下无法正常工作，受温度影响大 3) 采用蓄电池驱动的车辆只能在低速情况下运行 4) 寿命短，2~3 年更换一次 5) 快速充电性能差，不允许深度放电，深度充电对其性能和寿命有很大影响 6) 部分蓄电池含有重金属，对环境污染极大 7) 充电时间长，一般要 0.5~10h
超 级 电 容	1) 循环使用寿命长（约 100 万次） 2) 充电速度快（0.3s 至 15min） 3) 充放电效率高（98%） 4) 功率密度高（1000~10000W/kg） 5) 工作温度范围宽（-40~70℃），容量变化小 6) 制动时再生能量回收效率高，常规制动时回收高达 70%，相对成本低 7) 综合运营成本大大低于化学电池	1) 超级电容能量密度低，续航里程较短 2) 车辆体积和重量增加较大 3) 需要不间断充电

混合动力车辆的优缺点见表 5-1-5。

表 5-1-5 混合动力车辆的优缺点

	优 点	缺 点
城市环境	不需要安装接触网等基础设施，利于美化城市环境	
车辆方面	不需要受电弓等接触受流器件，杜绝了摩擦损耗	此类车速度都低于 60km/h，受蓄电池和电容技术研制，续航能力较弱，一般小于 5km。因此暂时不能实现真正意义上的无弓受流 电容或蓄电池体积大，环境适应能力差，重量重，且蓄电池寿命较短，如采用高性能蓄电池，则成本较高
节能环保	噪声低，舒适度高	采用柴油机发电驱动技术的车辆的效率低，且柴油机重量重，不环保



(2) 典型混合动力系统分析

根据目前的发展,存在两种主流混合动力方式,如图 5-1-4 所示。

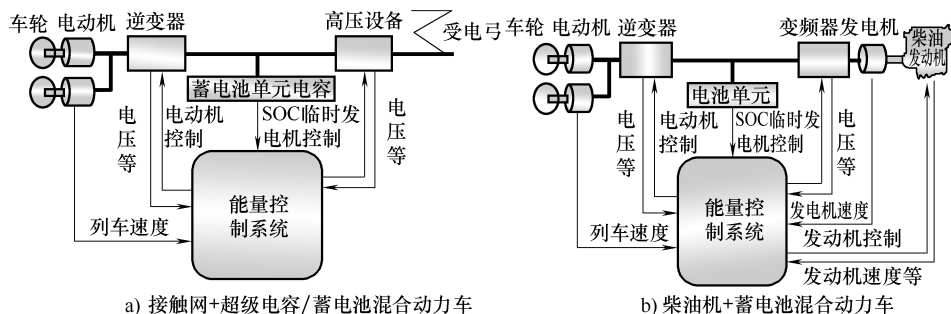


图 5-1-4 混合动力方式

图 5-1-4a 所示车辆同时装有受电弓和储能装置(如蓄电池、超级电容,或二者兼有),这类车辆一般能运行在两种区域,既可在架设接触网的区域,如城市郊区,也可在无法架设接触网的区域,如城市核心区。在郊区运行时,通过接触网受流驱动列车前进,同时给车载蓄电池充电。在核心区运行时,蓄电池放电驱动列车前进。

接触网+超级电容/蓄电池混合动力车辆由牵引变换器、DC/DC 变换器、超级电容箱/动力电池箱、辅助电源箱和控制系统组成。该系统能实现接触网和车载储能装置共同供电驱动牵引电动机的功能。在接触网有电时,由接触网为牵引变换器供电。在脱离接触网或接触网无电时,由超级电容或动力电池通过 DC/DC 变换器分别向牵引变换器提供电源,以驱动牵引电动机。其主电路电气原理如图 5-1-5 所示。

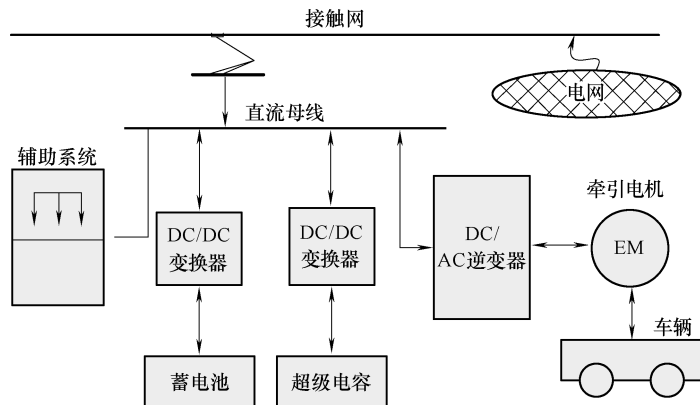


图 5-1-5 混合动力主电路框图

其中,DC 750V 为直流电网供电电源,蓄电池和充电电路及超级电容和充电电路将电网电压转换成蓄电池组能接收的电压,且其充电电流可控,牵引逆变器将直流电压转换成电压和频率变化的交流电压,用于驱动牵引电机。

DC/DC 变换器在有电网且电网有电的情况下,向超级电容组和动力电池组充电。在无电网或电网无电的情况下,由超级电容组和动力电池组通过 DC/DC 变换器为牵引变换器



供电。

在充电工况时，DC/DC 变换器将电网电压转化成超级电容或蓄电池所能接收的电压，同时其充电电流可控。蓄电池组有专用的充电电流传感器，当充电电流超过限值时，DC/DC 变换器电压会自动降低，将充电电流控制在限值内。由于牵引变换器不需要电气隔离，电路结构简单、控制方便，工作效率能超过 90%。

在放电工况时，由蓄电池供电，将电压升至 750V 左右，能量实现反向流动，如图 5-1-6 所示。

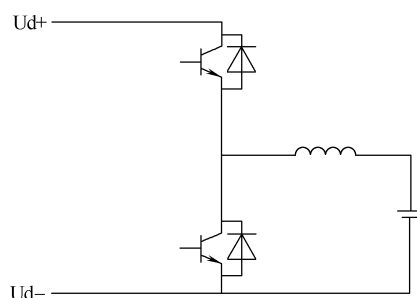


图 5-1-6 DC/DC 变换器电气原理

5.1.3 混合动力轨道车辆应用前景分析

研制混合动力有轨电车的目的是减少车辆的能耗，其特点是站间距短，车辆起停频繁，运行轨迹基本上是加速——惰行——制动减速，且制动减速时间与加速时间相差不大，而常规有轨电车制动时基本采用能耗制动方式，能量损失严重。

与仅由电网供电的有轨电车相比，混合动力有轨电车具有以下优势：

- 线路条件与既有线路兼容，可在既有铁路上运行。
- 变换器能运用于不便建设牵引供电系统和接触网系统的城郊及隧道等场所。
- 减少了牵引供电系统及弓网系统的投资，并可减小隧道截面积，大大降低了工程造价。
- 避免了牵引供电系统和弓网故障引起的事故，提高了列车运行的可靠性。
- 能回收大部分制动能量，基本杜绝能耗制动，提高了能量利用效率。
- 受气候条件影响小，尤其是在发生战争、灾难等紧急情况时，具有快速、高效的应急作用。
- 在不影响市容的情况下，可极大减轻城市交通压力，绿色环保，适合未来城市发展需要。

综合估计，采用混合动力模式，运行能耗至少能减少 20%。

混合动力轨道车辆可提供较强的无电网续驶能力，这使城市内某些拥挤地域可不用架设电网，既有利于环境美观，又减少了成本投入。因此，混合动力技术及车辆的研究有良好的经济效益和社会效益。作为城轨交通的重要组成部分，研究有轨电车的低碳化应用非常有意义，尤其是带电网供电的轻轨列车的低碳化研究，在城市轨道交通领域颇受欢迎。

目前，世界各国都在加紧研发更加安全可靠、节能环保的轨道交通系统。混合动力有轨电车是未来列车发展的趋势，混合动力能源供给和能量回收系统是列车的核心。作为一种高效、环保、节能的新型列车，混合动力有轨电车是一种潜力巨大的新型交通工具，将极大促进轨道交通系统的重大改革和发展。本章以唐车公司研制的 100% 低地板混合动力有轨电车（图 5-1-7）的



图 5-1-7 100% 低地板有轨电车



动力电池 + 超级电容混合动力系统为例，讲解城市有轨电车用混合动力技术。

5.2 混合动力系统组成及技术参数

唐车公司研发的 100% 低地板有轨电车设置有超级电容和动力电池。当列车通过无电区时，以超级电容和动力电池作为驱动电源。列车可以 35km/h 的速度运行 20min 以上。列车制动时，优先将制动能量存储在超级电容中，以备列车牵引或辅助设备使用，待超级电容和动力电池充电完成后，再将能量反馈到电网中，以减少制动能量损耗。

该混合动力系统主要包括牵引逆变器、牵引电动机、DC/DC 变换器、超级电容和动力电池，可实现接触网和车载储能装置共同供电驱动牵引电动机的功能。其主电路原理如图 5-2-1 所示。

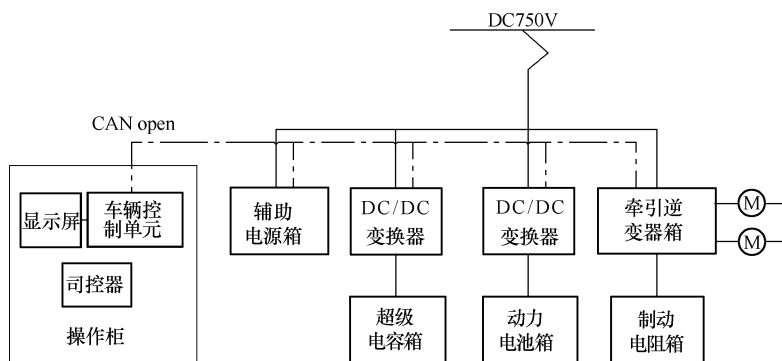


图 5-2-1 主电路原理

混合动力电源箱采用模块化设计，包括 1 个 DC/DC 电源箱（含 2 个双向 DC/DC 斩波器）、1 个超级电容箱（含 2 组超级电容及能量管理系统）和 1 个动力电池箱（含 1 组动力电池及能量管理系统）。电网有电时，混合动力电源箱以 DC 750V 网压分别给超级电容、动力电池充电。电网断电时，混合动力电源箱可通过 DC/DC 变换器，将超级电容、动力电池的电压转换成 DC 750V 电压，向牵引逆变器提供电源，以驱动牵引电动机，保证车辆正常运行。控制系统包含主处理单元 VCU（Vehicle Control Unit）、显示屏单元 IDU（Interface Display Unit）和司控器。

5.2.1 DC/DC 变换器主要技术参数

► 当 DC/DC 变换器作为充电机对动力电池充电时

主电压：DC 750V（范围 DC 500 ~ DC 950V，来自电网）

控制电压：DC 24V（范围 DC 17 ~ 30V，来自动力电池）

输出电压：DC 480V（范围 DC 340 ~ 518V）

输出电流：80A

输出电压纹波系数： $\leq 1\%$ （接动力电池负载）

充电机有充电特性管理功能（含温度补偿），能根据动力电池的状态控制充电电流和充



电电压，增加动力电池的使用寿命。

➤ 当动力电池侧 DC/DC 变换器作为供电电源对外放电时

主电压：DC 480V（范围 DC 340 ~ 518V）
 最大输入电流：120A
 控制电压：DC 24V（范围 DC 17 ~ 30V，来自动力电池）
 输出特性：DC 750V ± 5%

➤ 当 DC/DC 变换器作为充电机对超级电容充电时

主电压：DC 750V（范围 DC 500 ~ 950V，来自电网）
 控制电压：DC 24V（范围 DC 17 ~ 30V，来自动力电池）
 输出特性：
 输出电压：DC 480V（范围 DC 340 ~ 518V）
 最大输出电流：400A

➤ 当超级电容侧 DC/DC 变换器作为供电电源对外放电时

主电压：DC 480V（范围 DC 288 ~ 518V）
 最大输入电流：700A
 控制电压：DC 24V（范围 DC 17 ~ 30V，来自动力电池）
 输出特性：DC 750V ± 5%

5.2.2 混合动力电源箱主要技术参数

安装方式：车顶安装
 环境温度：- 25 ~ 50℃
 海拔高度：< 2500m
 冷却：强迫风冷（外部供 DC 24V，自带风扇）
 是否隔离：否
 外形尺寸：≤ 2000mm × 2000mm × 600mm（长 × 宽 × 高）
 重量要求：≤ 1500kg
 保护功能：输入过、欠压保护，输出过流保护、
 输出路保护、内部散热器过温保护
 通信方式：采用标准 CAN open
 防护等级：IP65

5.2.3 牵引逆变器

牵引逆变器主要包括线路接触器组、IGBT 逆变器及斩波器功率单元、逻辑控制单元及滤波电容器等部件，其作用是通过将直流电压变换成可变电压、可变频率的三相交流电，驱动牵引电机带动车辆运行（牵引工况），将牵引电机发出的三相交流电变换成直流电回馈到电网或其他储能设备（再生制动工况）中，或通过斩波器将发出的直流电能消耗在制动电阻上（电阻制动工况）。

牵引逆变器的功能包括：

➤ 列车运行状态、运行模式的判断和控制，至少包括运行方向、牵引、制动、惰行、快



速制动、紧急制动、紧急牵引。

- 牵引力、制动力的计算和控制。
- 对牵引逆变器实际值的检测、计算和对牵引逆变器的控制。
- 负载补偿,判断负载信号的大小,调节牵引力、制动力的大小。
- 防空转/防滑。
- 冲动极限控制,对牵引加速度和制动减速度的变化率进行限制。
- 牵引逆变器、制动电阻、牵引电机各种参数的监控和保护。
- 同控制系统时钟同步功能。
- 实际黏着系数的检测,以利用最大的黏着力,从而充分利用电制动。
- 列车超速保护。
- 控制系统自诊断(包括硬件与软件)。
- 故障评估、储存、处理功能。

5.2.4 制动电阻

制动电阻在牵引逆变器的电阻制动工况下使用,用于消耗制动工况下牵引电机产生的能量,制动电阻的设计经过与牵引逆变器的电气参数匹配。

一个牵引逆变器配一套制动电阻,每套制动电阻内部包含2组制动电阻模块。

制动电阻采用强迫风冷方式,进风口设网罩,以防止落叶或纸片等杂物吸入。网罩便于快速拆卸与清洗。制动电阻冷却系统采取降噪控制,并根据制动电阻的工作状态对冷却系统进行分级控制,以降低噪声。

集中控制单元对制动电阻的温度、电流和冷却系统的风量进行监控,配备独立的温度传感器监测温度。

制动电阻箱内的电阻元件及安装架、绝缘子等安装牢固、稳定,有良好的耐热性,又有足够的电气间隙和爬电距离。

5.2.5 牵引电机

牵引电机采用三相笼式异步牵引电机。牵引电机用于车辆牵引和制动,牵引工况由牵引逆变器供电,牵引电机通过齿轮传动装置为车轴提供动力。制动工况由牵引电机发电,对电网进行反馈(再生制动),或将能量消耗在制动电阻上(电阻制动)。牵引电机过流、过压、过热、超速等情况由牵引控制单元监测并保护。

5.3 混合动力系统性能参数估算

混合动力系统参数匹配计算是一个多目标、多变量的优化问题,需要通过合理确定混合动力系统中各动力部件的参数和整车控制策略,来实现整车动力性、经济性的优化。

5.3.1 混合动力系统相关参数

(1) 列车配置

列车布局如图5-3-1所示。列车由4个模块编组,其中3个模块装有动车转向架1个模



块装有拖车转向架，2 个中间车车顶布置混合动力电源箱。

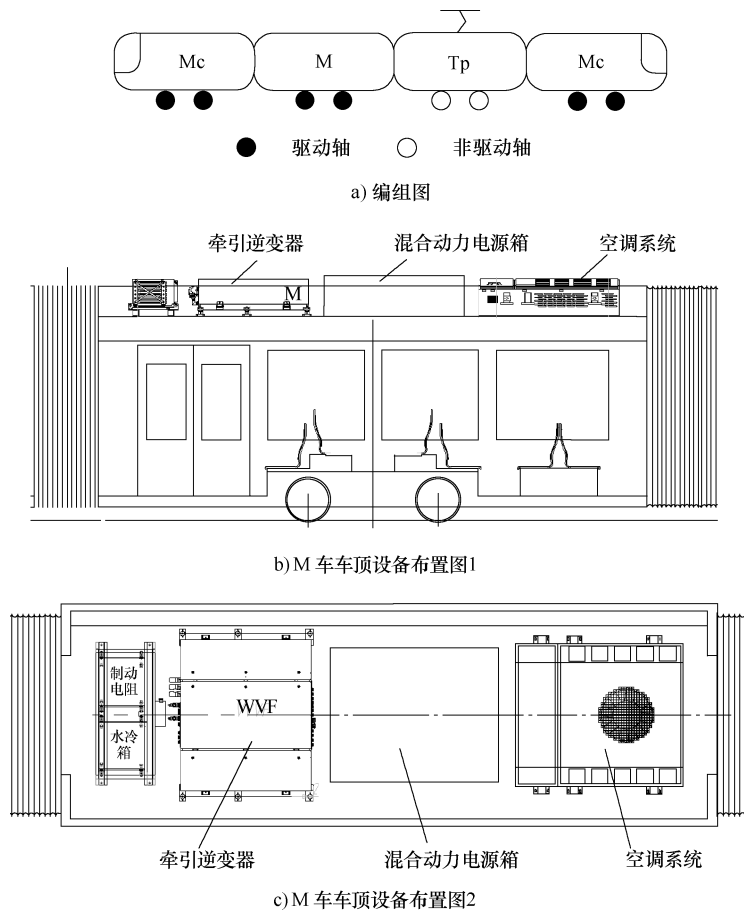


图 5-3-1 列车布局图

编组方式：- Mc + M * Tp + Mc -

Mc：安装动力转向架和司机室的动车模块

M：安装动力转向架的动车模块

Tp：安装受电弓和拖车转向架的拖车模块

+：风挡铰接结构

*：风挡双铰结构

—：前端车钩

(2) 车体主要尺寸

Mc 车：9200mm

M 车：7800mm

Tp 车：7200mm

列车长度：37340mm

车辆高度：3500mm



车体宽度: 2650mm

客室地板面距走行轨顶面高度: 350mm

客室内净高(中间站立区/最低处): 2160mm

(3) 重量配置

列车自重: 52t

轴重: 车辆动力转向架每根动轴实际测得的轴重与该车各动轴平均轴重之差, 不超过实际平均轴重的2%。

车辆载荷能力: 载客能力见表5-3-1, 乘客人均重量按60kg计算。

表 5-3-1 载客能力表

工 况	列车载员/人
AW0	0
AW1	80
AW2	316
AW3	394

(4) 混合动力系统设计参数

列车基本参数、电气设备参数以及动力性能指标分别见表5-3-2, 表5-3-3和表5-3-4。列车编组采用“3动1拖”结构, 每节动车由4个牵引电机提供动力, 整车共12个牵引电机。

表 5-3-2 列车基本参数

参 数		符 号	取值	单 位
整车质量	AW0 (载员0人)	m_{AW0}	52	t
	AW1 (载员0人)	m_{AW1}	65	t
	AW2 (载员336人)	m_{AW2}	79	t
	AW3 (载员474人)	m_{AW3}	84	t
车轮滚动半径(半磨耗)		r	0.315	m
迎风面积		A	9	m ²
风阻系数		C_w	0.5	-
机械传动系统效率		η	97	%
传动系统的传动比		i_0	6.0	-
惯性质量系数		γ	0.09	-

表 5-3-3 电气设备参数

参 数	含 义	取 值	单 位
P_n	牵引电机的额定功率	60	kW
P_m	牵引电机的最大功率	150	kW
n_n	牵引电机的额定转速	1800	r/min
n_m	牵引电机的最高转速	4377	r/min



(续)

参 数	含 义	取 值	单 位
N_m	整车电机数量	12	台
λ	电机过载系数	1.23	-
η_0	电机效率	0.85	-
η_1	牵引逆变器的效率	90	%
η_2	DC/DC 变换器的效率	0.92	-
P_a	整车辅助功率	40	kW

表 5-3-4 动力性能指标（无电区）

参 数	符 号	取 值	单 位
持续运行车速	v_c	25	km/h
持续运行里程	t_c	10	km
最大驱动加速度	a_{dmax}	1.2	m/s ²
最大制动减速度	a_{bmax}	2.5	m/s ²
最大爬坡度	i_{max}	70	%
持续运行车速匀速行驶的续驶里程	s_{max}	10	km

5.3.2 车辆纵向动力学分析模型

(1) 列车纵向动力学模型

以一节车辆为例，车辆前后轮轴在同一个平面上且与地面平行。假设列车行驶在一个倾角为 β 的坡道上。图 5-3-2 所示为车辆纵向动力学模型。

图 5-3-2 中， $g = 9.81\text{m/s}^2$ ，为重力加速度； m 为列车质量； V_x 为列车纵向速度； F_{xf} 与 F_{xr} 分别为前、后轮的轮周与地面接触点处的纵向牵引力。

列车的运动是列车上受到的力与转矩作用的结果。轮周的纵向力使其前进或后退。

列车的重力始终作用在车身重心 (CG) 上。车辆动力学方程为

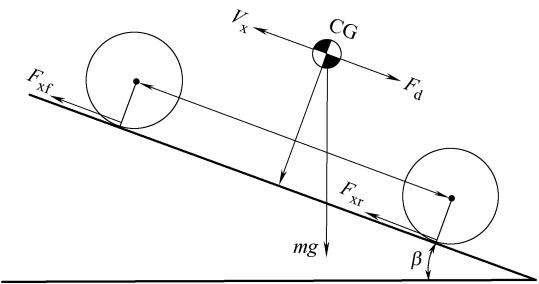


图 5-3-2 车辆纵向动力学模型

$$m \dot{V}_x = F_x - F_d - mgsin\beta \tag{5-3-1}$$

纵向牵引力为前后轮轴力之和

$$F_x = F_{xf} + F_{xr} \tag{5-3-2}$$

阻力分为基本阻力和附加阻力，在后文中将详细介绍。

列车的位移为



$$x = \int V_x dt \quad (5-3-3)$$

(2) 列车阻力的计算

阻力分为基本阻力和附加阻力，二者之和为列车受到的总阻力。

1) 基本阻力。常用单位基本阻力公式：

$$\omega'_0 = A + BV_x(t) + CV_x^2(t) \quad (5-3-4)$$

列车受到的基本阻力：

$$f_{bz} = \omega'_0 mg \quad (5-3-5)$$

式中，质量 m 的单位为 t 。

式 (5-3-4) 中的常数项 A 与速度无关，可认为与最大静摩擦力有关。当列车的速度为零时，列车受到的最大静摩擦力：

$$f_{sz} = A mg \quad (5-3-6)$$

根据以上分析，可得列车静止与运动时的通用基本阻力公式：

$$f_z = \begin{cases} sat_A(f_i(t)) & V_x(t) = 0 \\ (A + B|V_x(t)| + CV_x^2(t)) mg \operatorname{sgn}(V_x(t)) & V_x(t) \neq 0 \end{cases} \quad (5-3-7)$$

式中， $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为标准符号函数 $sat_A(\cdot)$ 中的饱和函数。

$$sat_A(f_i(t)) = \begin{cases} A mg, & f_i(t) > A mg \\ f_i(t), & -A mg \leq f_i(t) \leq A mg \\ -A mg, & f_i(t) < -A mg \end{cases} \quad (5-3-8)$$

列车的基本阻力是经验公式，它包含各种因素造成的阻力。

2) 附加阻力

① 风阻。正面迎风时列车受到的阻力可用下式表示：

$$f_{wd} = -\frac{1}{2} C_D \rho v_a^2 A \operatorname{sgn}(v_x) \quad (\text{N}) \quad (5-3-9)$$

式中， C_D ——风阻系数；

ρ ——空气密度，在 20°C 以及一个标准大气压下的值约为 1.205kg/m^3 ；

A ——列车正面投影面积，单位为 m^2 ；

v_a ——风速在垂直指向列车正面方向的分量，单位为 m/s 。

② 坡道阻力。列车在坡道上时，重力沿坡道下坡方向的分力形成坡道阻力。根据上、下坡情况的不同，坡道阻力有正负之分。理论上说，负坡道阻力实际上起牵引力的作用。

当列车位于坡度角为 β 的斜坡上时，重力 G 可分为两个分量：垂直分量 $G \cos \beta$ 与平行分量 $G \sin \beta$ 。垂直分量垂直于轨道，并被轨道的反作用力所抵消。平行分量与列车运行方向平行，成为由坡道产生的附加阻力。

由于坡道阻力 $mg \cdot \sin \beta$ 已经在式 (5-3-1) 中描述，附加阻力的计算中去除了坡道阻力项。

工程上一般用“坡度”来定义坡道的倾斜程度。通常将坡面的铅直高度和水平宽度的比值称作坡度，用百分数表示。例如，坡度 30% 指水平距离上前进了 100m 的情况下，垂直高度上升了 30m。



坡度角与坡度的关系:

$$\beta = \arctan(\theta) \quad (5-3-10)$$

式中, β ——坡度角, 单位为 ($^{\circ}$);

θ ——坡度 ($\%$)。

(3) 传动系统

列车采用变频控制策略, 牵引电机与轮轴的齿轮齿数比 (变速器传动比) 为一固定常数。牵引力与牵引电机转矩的关系:

$$F_t = \frac{i_0}{r} T_{\text{motor}} \quad (5-3-11)$$

式中, F_t ——列车轮周牵引力, 单位为 N;

T_{motor} ——牵引电机转矩, 单位为 N·m;

i_0 ——变速器传动比;

r ——列车轮周半径, 单位为 m。

(4) 速度控制器

速度控制器的作用是控制牵引电机的转速。它的输入是期望转速和实测转速, 通过 PI 调节器调节, 输出牵引电机的期望转矩指令值。电机控制系统作为执行机构根据期望转矩指令值输出相应的牵引转矩, 牵引转矩作用于列车, 列车开始运行。

速度控制器的输出期望转矩指令值由 PI 控制器获得

$$T_e^* = K_p(\omega_r^* - \omega_r) + K_i \int (\omega_r^* - \omega_r) dt \quad (5-3-12)$$

式中, K_p 、 K_i ——PI 参数;

ω_r^* 、 ω_r ——分别为期望转速和实测转速, 单位为 r/min。

期望转速按列车自动控制系统计算得到的运行曲线查表得到。由运行曲线得到的速度为列车速度 (km/h), 而速度控制器中的输入速度为牵引电机转速。它们之间的关系:

$$\omega_r^* = \frac{3.6 V_x^* i_0}{0.377 r} \quad (5-3-13)$$

式中, V_x^* ——列车期望速度, 单位为 km/h。

列车电力牵引系统的电气装置有一定的功率限制, 当功率达到最高限制 $\bar{P}$ 时, 列车功率不能再升高。由于功率等于牵引电机转速与转矩的乘积, 此时列车如果仍需加速, 则需要降低转矩。于是, 输出转矩等于

$$T_e = \text{sat}_T(T_e^*) \quad (5-3-14)$$

其中,

$$\text{sat}_T(T_e^*) = \begin{cases} |\bar{P}/\omega_r|, & T_e^* > |\bar{P}/\omega_r| \\ T_e^*, & -|\bar{P}/\omega_r| \leq T_e^* \leq |\bar{P}/\omega_r| \\ -|\bar{P}/\omega_r|, & T_e^* < -|\bar{P}/\omega_r| \end{cases} \quad (5-3-15)$$

图 5-3-3 所示为牵引电机转矩随时间的变化情况, 图 5-3-4 所示为转矩与列车速度的对应关系。由图中可看出, 列车在 36 km/h 左右进入恒功率区, 随着列车行驶速度的增加, 牵引转矩开始减小。

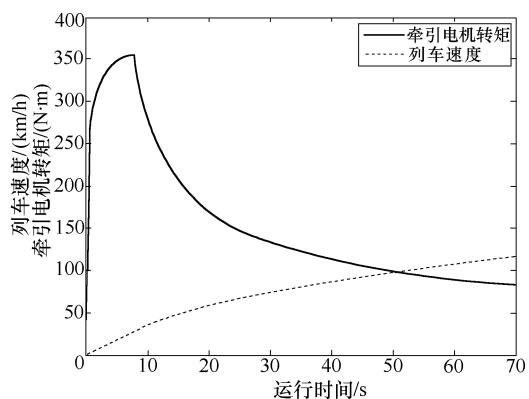


图 5-3-3 牵引电机转矩、列车速度的响应曲线

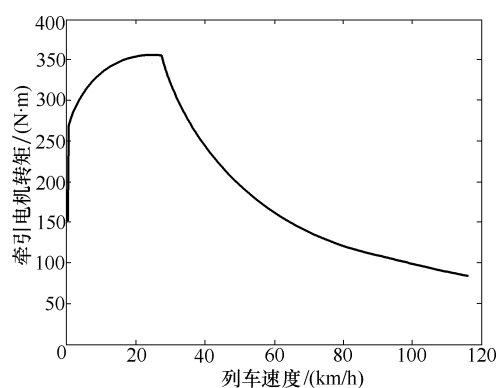


图 5-3-4 牵引电机转矩-列车速度关系曲线

5.3.3 系统参数匹配计算方法

为方便下文描述，给出一些符号的定义，见表 5-3-5。

表 5-3-5 相关符号定义

参 数	含 义	单 位
w_0	单位基本阻力	N/kN
m	列车整车质量	t
G_d	包含回转质量在内的列车总质量	t
v	列车车速	km/h
a	列车加速度	m/s ²
α	坡度角	rad
F_t	列车驱动轮的驱动力	kN
F_b	列车基本阻力	kN
F_g	列车爬坡阻力	kN
F_f	由大风引起的附加阻力	kN
P_t	整车轮周功率	kW
P	全部牵引电机总输出功率	kW

(1) 牵引系统特性计算

根据列车牵引理论，整车驱动轮的驱动力 F_t (kN) 可由下式计算：

$$F_t = F_b + F_g + F_f + \frac{G_d}{3.6} \frac{dv}{dt} \quad (5-3-16)$$

式中， $F_b = \frac{mgw_0}{1000}$ ， $F_g = mgsin\alpha$ 。

整车轮周功率 P_t

$$P_t = F_t \frac{v}{3.6} \quad (5-3-17)$$



牵引电机总输出功率 P (含整车全部电机的总功率) 为

$$P = P_t / \eta \quad (5-3-18)$$

式中, η ——传动系统的效率。

牵引电机总输出转矩 T_t ($\text{kN} \cdot \text{m}$) 为

$$T_t = \frac{F_t r}{i_0 \eta} \quad (5-3-19)$$

牵引电机转速 n (r/min) 为

$$n = \frac{v i_0}{0.377 r} \quad (5-3-20)$$

牵引电机的牵引特性曲线如图 5-3-5 所示。当牵引电机进入恒功率区后, 列车为进一步提速, 必须降低牵引电机转矩, 列车的加速度会持续降低。列车会以逐渐减小的加速度提速, 在牵引力曲线与基本阻力曲线相交处, 列车达到最高速度。若两条曲线在牵引电机达到最大转速前无交点, 则列车的最高速度由牵引电机的最高转速决定。

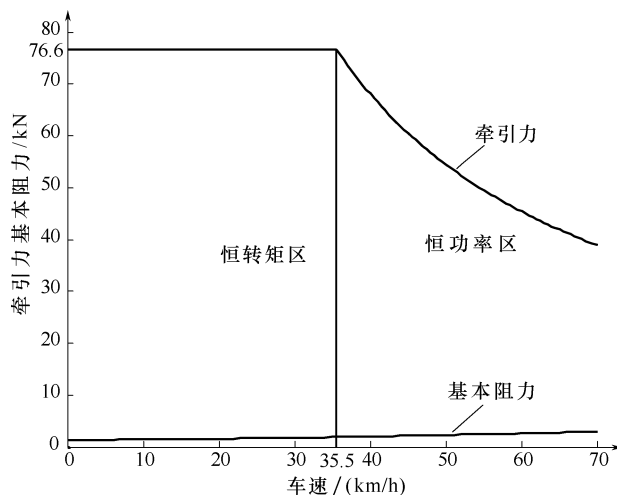


图 5-3-5 牵引特性曲线示意图

牵引电机总输入功率 P_0 可由下式计算:

$$P_0 = P / \eta_0 \quad (5-3-21)$$

式中, η_0 ——电机效率。

牵引电机可提供的额定转矩 T_n 为

$$T_n = 9.550 \frac{P_n}{n} \quad (5-3-22)$$

牵引逆变器所需输入功率 P_1 为

$$P_1 = P_0 / \eta_1 \quad (5-3-23)$$

式中, η_1 ——牵引逆变器效率。

DC/DC 变换器所需输入功率 P_2 (即储能设备所需输出功率) 为

$$P_2 = (P_1 + P_a) / \eta_2 \quad (5-3-24)$$



式中, P_1 ——DC/DC 变换器所需输出功率, 即牵引逆变器所需输入功率, 单位为 W;
 P_a ——列车照明、空调等除牵引电机外的电气设备所需的辅助功率, 单位为 W;
 η_2 ——DC/DC 变换器效率。

(2) 混合动力系统性能指标

通过动力性能指标可确定列车的各种动力参数。常用的指标有最高车速、最大爬坡度、加速性能。确定这些指标的具体值后, 就可确定牵引电机的动力需求, 为牵引电机选型提供依据, 进而得到电源的功率和能量需求。

为简化计算, 一般可将 $\sin\alpha$ 近似为坡度 i , 即 $i \approx \sin\alpha$, 此时牵引力为

$$F_t = mgi + \frac{mgw_0}{1000} \quad (5-3-25)$$

将最大坡度值 $i_{\max}$ 代入式 (5-3-25), 即可求出满足最大爬坡度要求所需的牵引力。将求得的牵引力代入式 (5-3-17) 和式 (5-3-18) 中就可进一步求得电机所需峰值功率的一个最小值。

车辆在平直轨道匀加速行驶时, 车辆的加速度 a 可表示为

$$a = \frac{dv}{3.6dt} = \frac{1}{G_d} \left(F_t - \frac{mgw_0}{1000} \right) = \frac{1}{G_d} \left(\frac{3.6P_x\eta}{v_a} - \frac{mgw_0}{1000} \right) \quad (5-3-26)$$

式中, P_x ——加速时牵引电机对应车速 v_a 的实际输出功率, 单位为 W。

根据牵引电机工作的外特性, 得到恒转矩区每一车速对应的电机输出功率 P_x 以及恒功率区的电机输出功率 P_3 , 进而得到电机所需峰值功率的最小值。

综合以上三个方面就可初步选择牵引电机, 确定牵引电机的额定功率、峰值功率、额定转矩、额定转速等相关参数。

5.3.4 储能设备能力计算

(1) 动力电池和超级电容数量计算

动力电池和超级电容数量的确定需遵循表 5-3-6 中的原则。

表 5-3-6 动力电池和超级电容数量确定原则

约束条件	动力电池	超级电容
功率约束 (最大功率需求)	由最高速度决定动力电池最大输出功率, 确定满足此功率的最小动力电池数量	由车辆以指定加速度匀加速到指定速度过程中的峰值功率, 确定满足该功率所需的超级电容数量
能量约束 (最大能量需求)	由最大续航里程决定动力电池总输出能量及满足此总能量需求的最小动力电池数量	由车辆以指定加速度加速到指定速度所需总能量及满足该能量所需的超级电容数量
串联电压约束 (总输出电压需求)	由动力电池相连器件 (DC/DC) 的工作电压决定动力电池组串联总电压及串联数	由超级电容相连器件 (DC/DC) 的工作电压决定超级电容组串联总电压及串联数

(2) 超级电容的参数

选用 Maxwell 超级电容能量储存模块 BMOD0165, 其基本参数见表 5-3-7。



表 5-3-7 Maxwell 超级电容模块 BMOD0615 详细参数

项 目	参 数 值
额定电容量/F	165
电容量容差 (%)	-0.2 ~ 0.2
额定电压/V	48
最低工作电压/V	28.8
浪涌电压/V	50.4
可用比功率密度/(W/kg)	3300
最大电流/A	98 (持续); 1900 (1s)
最大储存能量/(W·h)	52.8
比能量密度/(Wh·kg)	3.9
最大漏电流/mA	5.2
重量/kg	13.9
体积/L	14.515
外形尺寸/mm (H×W×D)	418×194×179
运行温度/℃	-40 ~ 70
寿命/年	10
内阻/mΩ	6.3

(3) 电池的参数

假定采用苏州星恒电源有限公司型号为 IFP32/101/192-40HA1 的锂电池电芯，详细参数见表 5-3-8，其放电特性曲线如图 5-3-6 所示。

表 5-3-8 IFP32/101/192-40HA1 的锂电池电芯参数

项 目	参 数
厚×宽×高	33mm×100mm×192mm
额定电压	3.2V
额定容量	40A·h
内阻	≤2mΩ
放电截止电压	2.5V
最大充电电压	3.8V
持续放电电流	120A
最大放电电流	200A
充电方法	CC/CV (恒流恒压)
重量	<1200g
工作温度	充电
-20 ~ 45℃	放电
常温容量 C ₁	≥40A·h
倍率放电	3C
循环寿命	2000 次 (常温 1C 循环至 70%，100% DOD)

单体动力电池能提供的最大输出能量 (J) 为

$$E_{\text{bmax}} = U_{\text{b-imax}} C_{\text{b}} D_{\text{b}} K_{\text{b}} \quad (5-3-27)$$

式中， $U_{\text{b-imax}}$ ——动力电池以最大持续放电电流工作时的电压，单位为 V；



C_b ——单体动力电池容量，单位为 $A \cdot h$ ；

D_b ——动力电池放电深度；

K_b ——动力电池容量冗余系数。

根据星恒公司提供的数据， $D_b = 0.8$ ， $K_b = 0.7695$ 。

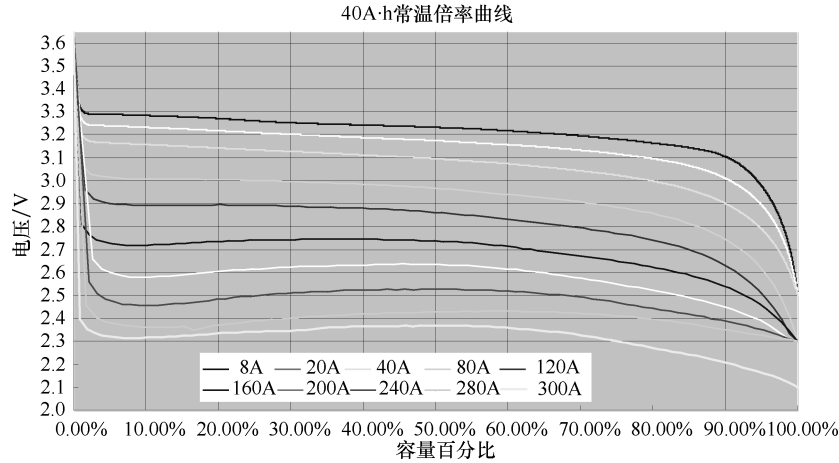


图 5-3-6 IFP32/101/192-40HA1 的锂电池电芯放电特性曲线

由图 5-3-6 中的放电特性曲线可知，当动力电池以最大持续电流 120A 放电时，其工作电压约为 2.8V，取 $U_{b-i\max} = 2.8V$ 。由式 (5-3-27) 可计算出单体动力电池能提供的能量约为 245950J，约合 0.0683kW·h。

单体动力电池能提供的最大输出功率 (W) 为

$$P_{b\max} = I_{\max} U_{b-i\max} \quad (5-3-28)$$

式中， $I_{\max}$ ——动力电池最大持续放电电流，单位为 A；

$U_{b-i\max}$ ——动力电池以电流 $I_{\max}$ 放电时对应工作电压，单位为 V。

由式 (5-3-28) 可计算得出： $P_{b\max} = 336W = 0.336kW$ 。

单体超级电容模块可利用的有效能量 (J) 为

$$E_{c\max} = \frac{1}{2} C_c (U_{c\max}^2 - U_{c\min}^2) \quad (5-3-29)$$

式中， C_c ——超级电容模块的额定容量，单位为 F；

$U_{c\max}$ ——超级电容的最高工作电压，单位为 V；

$U_{c\min}$ ——超级电容的最低工作电压，单位为 V。

一般取超级电容额定电压 60% 以上的电压范围为有效工作范围，故取 $U_{c\max} = 48V$ ， $U_{c\min} = 48V \times 0.6 = 28.8V$ ， $C_c = 165F$ ，由式 (5-3-29) 可计算得出： $E_{c\max} = 109490J = 0.0304kW \cdot h$ 。

单体超级电容模块的最大输出功率 (W) 为

$$P_{c\max} = P_{spe} m_c \quad (5-3-30)$$

式中， P_{spe} ——超级电容模块的可用比功率密度；

m_c ——超级电容模块的质量。

由式 (5-3-30) 计算，可得： $P_{c\max} = 3300W/kg \times 13.9kg = 45.87kW$ 。



5.3.5 动力电池及超级电容数量的确定

动力电池及超级电容数量的计算思路如图 5-3-7 所示。根据持续运行车速、加速度、爬坡度等性能指标，可计算出不同工况下的电机输出功率，由电机效率、牵引逆变器的效率、DC/DC 变换器的效率等计算出电源输出功率，然后得出相应的动力电池或超级电容的数量。

(1) 持续运行车速对动力电池数量的要求

列车在平直轨道上匀速运行时，对电源的输出功率相对较低，而对电源的输出能量要求较高。动力电池比能量高、比功率低，而超级电容比能量低、比功率高。因此只考虑用动力电池作持续运行动力电源，用超级电容作加速、坡道运行等工况下的高功率电源。

功率约束：对平直轨道上匀速行驶的列车，车速越高，电源需要输出的功率越大，相应需要的动力电池数量也越大，如图 5-3-8a 所示。其中，曲线节点处的数字代表不同车速下电源输出功率对最小动力电池数量的要求。

能量约束：图 5-3-8b 所示的曲线分别为不同速度级别下行驶 5、10、15km 所需的总能量。其中，曲线节点处的数字代表不同车速下行驶相应里程所需能量对最小动力电池数量的最低要求。

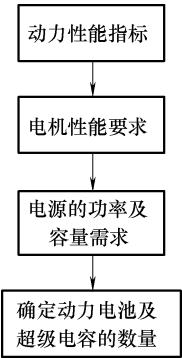


图 5-3-7 动力电池及超级电容数量的计算思路

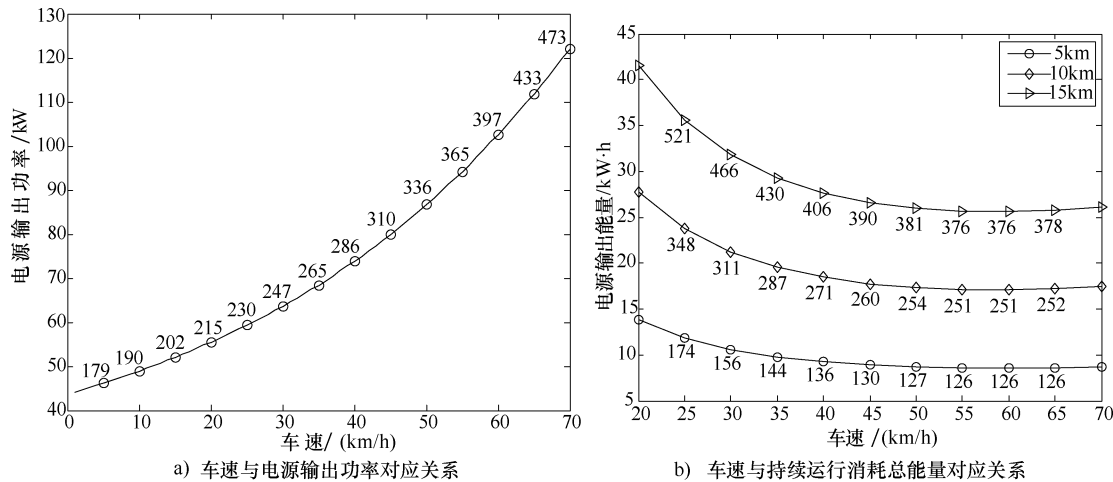


图 5-3-8 车速对电源功率和能耗的影响及对应的最小动力电池数量需求

串联电压约束：若 DC/DC 变换器输出的最高端电压为 480V，为保证动力电池能充满，选择 136 节串联，每节平均电压 3.53V，最低保护电压 2.5V。136 节串联动力电池的工作电压范围为 340~480V，其额定工作电压是 435V。按此串联方案，136 个动力电池能提供的最大输出功率理论值为： $0.336\text{kW} \times 136 = 45.7\text{kW}$ ，最大输出能量理论值为： $0.0683\text{kW} \cdot \text{h} \times 136 = 9.29\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

在平直轨道上以 25km/h 匀速行驶时：



从功率约束角度考虑,牵引力为 1.556kN ,电机转矩为 $0.0842\text{kN}\cdot\text{m}$,电源输出功率 59.3kW (其中,牵引功率 15.8kW ,辅助功率 43.5kW),对应需要的动力电池数量为 177 个 (每个动力电池提供 0.336kW),考虑 30% 的设计冗余为 230 个。

从能量约束角度考虑,每个动力电池提供的能量为 $0.068\text{kW}\cdot\text{h}$,持续运行 24min (10km) 电源输出能量为 $23.72\text{kW}\cdot\text{h}$,需要的动力电池数量为 348 个。

(2) 起动加速度对超级电容参数的影响

当列车加速到一定速度时,电机的输出功率达到额定功率后将进入一个恒功率区。图 5-3-9a 所示为不同加速度下车速与牵引电机输出功率的关系曲线。图 5-3-9b 所示为不同加速度下由静止加速到指定车速过程中总能量的需求对应关系。图 5-3-9 中曲线节点处的数字代表从静止加速到相应车速所需的超级电容的最小数量。

综上,加速需要的超级电容数量随功率需求的增大而增大。每节列车配置 2 并 10 串的 Maxwell BMOD0615 超级电容模块,能满足列车以 $0.2\sim 1.2\text{m/s}^2$ 等不同加速度从静止加速到 25km/h 的要求 (最大可达 32km/h)。

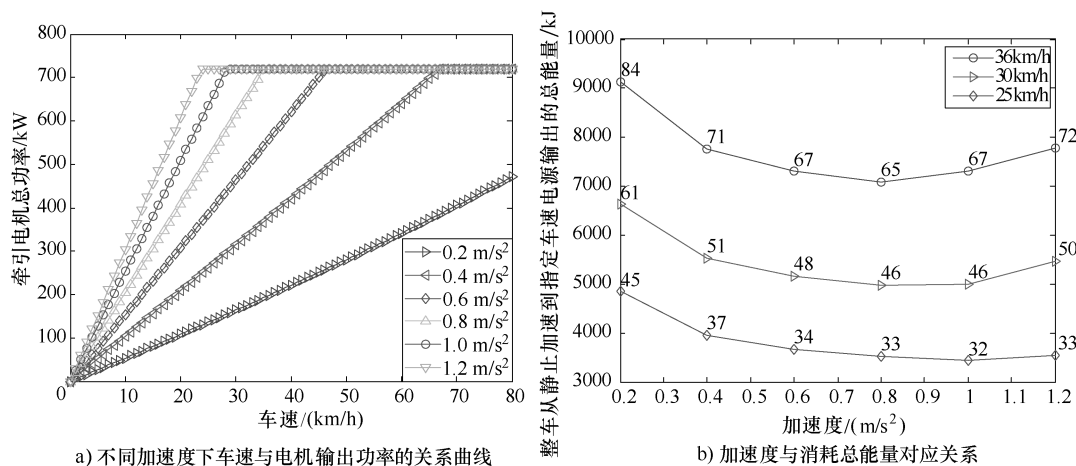


图 5-3-9 加速度对电源功率和能耗的影响及对应的超级电容最小数量需求

(3) 最大爬坡度对超级电容参数的影响

假定坡道运行时完全由超级电容提供牵引电能。

功率约束:假定在爬坡工况下,完全由超级电容组提供驱动能源。在不同坡度的坡道上以不同车速爬坡时,对应所需的牵引功率和超级电容数量如图 5-3-10a 所示。由图可见,坡度的大小对牵引功率的大小影响也很大,但超级电容可满足功率需求。若列车均配置 10 串 2 并超级电容模块,则可满足 7% 坡度的爬坡功率需求。

能量约束:若爬坡完全由超级电容供电,以整车 10 串 6 并共 60 个超级电容为例,计算了一组在满足功率前提下对应的续驶里程 (m),标注在图 5-3-10b 中。可见,超级电容仅能满足较短距离的爬坡需求。若坡道长度过长,则完全由超级电容供电难以满足整个爬坡过程的能量需求。

由不同坡度对应的功率、能量需求来看,不论是只用动力电池,还是只用超级电容驱动列车在坡道上行驶,均需较高数量。其原因在于,在坡度较大时,列车爬坡时对功率和能量的要求都非常高。动力电池组能提供较大能量,但不能提供足够高的功率。相反,超级电容

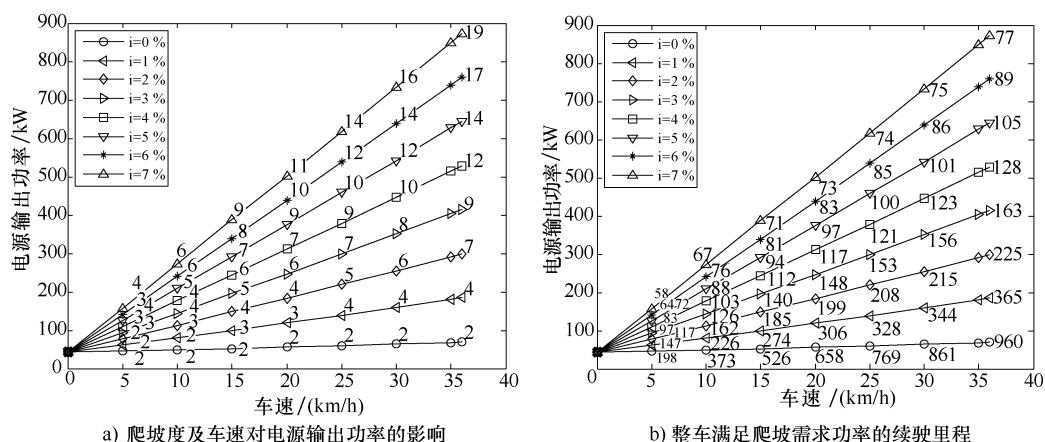


图 5-3-10 在不同坡度的坡道上以不同车速爬坡时对应所需的电源输出功率和超级电容数量

组能提供较高功率，但不能提供足够高的能量。因此，动力电池组和超级电容组功率、能量的合理分配可发挥两者能力上的优势，弥补各自的功能瓶颈。

5.3.6 制动能量回收

有轨电车的制动能量回收系统通过将列车的动能转化为其他形式的能量，使列车或其他对象减速，而转化的能量可进行再利用或储存。储存的回收能量又可在无网时驱动列车，减少了充电站等建设投入，维持了城市美观。因其可靠、高效、环保、节能的优点，将是未来城市轨道交通发展的方向。

在混合动力有轨电车系统中，能量供给和制动能量回收是通过能量管理系统实现的，该系统负责采集储能设备、能量传递电路、机电系统等信息，通过某种机制的决策进行车辆加减速、储能设备充放电控制等。

东日本铁路公司针对燃料电池混合动力有轨电车，开发了符合燃料电池特性的能量管理系统：停车时，燃料电池向蓄电池充电；高速运行时，所需能量由燃料电池和蓄电池同时提供；慢行时，燃料电池在提供驱动能量的同时向蓄电池充电；制动时，将再生制动能量回收至蓄电池。

西门子、卡福等国的车辆则优先采用超级电容吸收制动能量，试验证明，利用超级电容吸收制动能量，效率更好，节能效果更好。

目前，国内外新能源列车也在研究采用超级电容为主、蓄电池为辅的制动能量回收策略。

5.4 双向 DC/DC 变换器工作原理

双向 DC/DC 变换器在混合动力有轨电车的电源系统与驱动系统之间起双向能量转换的重要作用，可根据系统的运行需求完成相应的功能。根据混合动力有轨电车大功率应用场合，以超级电容和蓄电池作储能元器件，研究对比各种适用的非隔离型拓扑结构，主要从电路中功率器件数量和电气应力等多方面的比较着手，选择适合混合动力有轨电车的双向 DC/DC 变换器，并给出主电路的参数设计。



5.4.1 双向 DC/DC 变换器的工作要求

在混合动力系统中,通过加入超级电容和双向 DC/DC 变换器可增加瞬时功率,从而优化有轨电车的加速和减速性能。如何选择高效率的双向变换器拓扑以及合理控制策略是决定混合动力有轨电车性能的关键因素之一。

根据有轨电车的实际应用情况,双向 DC/DC 变换器应满足以下工作要求:

- 有轨电车车顶安装空间有限,在输出功率一定的条件下应具有很高的功率体积比。
- 超级电容端电压在频繁的充放电过程中变化范围很大,要求双向 DC/DC 变换器具有稳定输出电压的功能。
- 储能模块输出功率因受空间限制无法设计得太宽裕,要求双向 DC/DC 变换器具有很高的工作效率,以有效延长车辆行驶里程。

5.4.2 双向 DC/DC 变换器拓扑结构的选择

双向 DC/DC 变换器主要可分为两类:变压器隔离型双向 DC/DC 变换器和非隔离型双向 DC/DC 变换器。其中,隔离型双向 DC/DC 变换器是在非隔离型双向变换器中插入高频变压器,构成隔离型拓扑,变压器的原副边可由全桥、半桥、推挽等电路拓扑构成。

隔离型双向 DC/DC 变换器拓扑主要有:双反激拓扑、双推挽拓扑、双半桥拓扑、双全桥拓扑。

典型非隔离型单向 DC/DC 变换器有 6 种基本拓扑:BUCK、BOOST、BUCK-BOOST、CUK、SEPIC、ZETA,把它们当中的二极管替换为开关,可组成 5 种双向 DC/DC 变换器拓扑结构(BUCK 和 BOOST 替换后为同一种拓扑)。

从超级电容储能体积及成本上考虑,其端电压值一般低于电机驱动逆变器的工作电压。这就要求双向 DC/DC 变换器在正向工作时具有升压斩波能力,在电机处于再生发电状态时,通过降压电路将制动回馈能量转换为电能储存在超级电容中。隔离型与非隔离型变换器都能满足以上要求,但隔离型变换器的控制方式和结构都比较复杂,所用的元器件数量和种类比较多,功率密度和性价比都不高,体积也无法得到最优化,因此从非隔离型变换器中选择适合的拓扑结构。

考虑到实际应用中功能的需要,结构和操作简单,选择了如图 5-4-1 所示的双向 DC/DC 变换器。其中,左端是低压端,接动力电池或超级电容等储能装置。右端是高压端,接直流母线。当储能装置放电时,DC/DC 变换器升压,将电压从低压端 V_1 升压至高压端 V_2 ,此时储能装置向负载传输功率。当车辆进行能量回馈时,DC/DC 变换器降压,将电压从高压端 V_2 降至低压端 V_1 ,以便使储能装置吸收回馈能量。

变换器正向工作时, G_1 作为 PWM 开关管工作, G_2 截止,储能电感 L 、开关管 G_1 、二极管 D_1 、 D_2 、滤波电容 C_2 ,组成一个 Boost 电路,其等效电路如图 5-4-2 所示。

在实际应用中,开关频率比较高,因此只考虑电感电流连续的情况。设一个周期内开关的开通时间为 $t_{on} = DT$,关断时间为 $t_{off} = (1 - D)T$,那么输入与输出电压的关系为: $V_2 = \frac{V_1}{1 - D}$,根据输入电压 V_1 ,调节占空比 D ,就可得到期望的输出电压 V_2 ,且 $V_2 > V_1$,达到了电源放电时升压的目的。

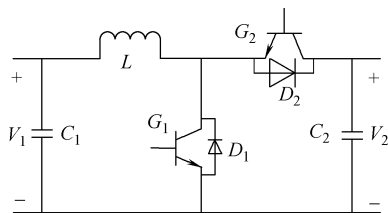


图 5-4-1 双向 DC/DC 变换器拓扑

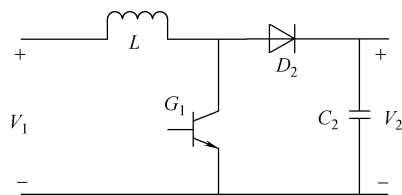


图 5-4-2 正向 Boost 电路

变换器反向工作时， G_2 作为 PWM 开关管工作， G_1 截止，储能电感 L 、开关管 G_2 、二极管 D_1 、 D_2 、滤波电容 C_1 ，组成一个反向 Buck 电路，其等效电路如图 5-4-3 所示。

设一个周期内开关的开通时间为 $t_{on} = DT$ ，关断时间为 $t_{off} = (1 - D)T$ ，那么输入与输出电压的关系为： $V_1 = DV_2$ ，根据输入电压 V_2 ，调节占空比 D ，就可得到期望的输出电压 V_1 ，且 $V_1 < V_2$ ，达到了给电源充电时降压的目的。

5.4.3 双向 DC/DC 变换器模型

混合电源系统由电力电子变换器、PWM 调制器、驱动电路和反馈控制单元构成，如图 5-4-4 所示。由控制理论可知，混合电源系统的静态和动态性能与反馈控制设计密切相关。要进行反馈控制设计，首先要了解被控对象的动态模型。图 5-4-4 中，在进行反馈控制设计前，首先要获得电力电子变换器的动态模型，从而得到其传递函数。一旦获得被控对象的传递函数，就可利用自动控制理论来进行反馈控制设计。

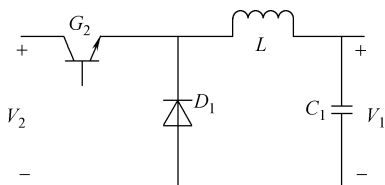


图 5-4-3 反向 Buck 电路

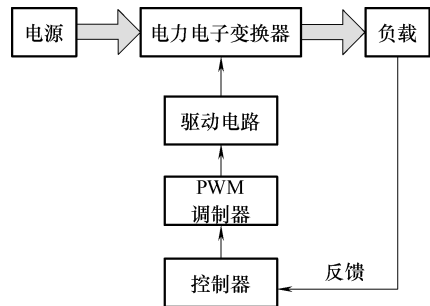


图 5-4-4 电源系统结构

(1) 大信号模型

由于 DC/DC 变换器中包含功率开关器件或二极管等非线性元件，它是非线性系统。采用小信号分析法在工作点附近线性化建模，则系统在工作点附近运行可能是稳定的，但受到较大的扰动时，却有可能不稳定。因此，在较大的干扰或较大的参数变化时，建立大信号模型是十分必要的。

在复合电源释能时，双向 DC/DC 变换器相当于图 5-4-5 所示的常规 Boost 变换器运行。电感电流连续，一个开关周期可分为两个阶段。在阶段 1，开关 G_1 闭合，电感处于充磁阶段；在阶段 2，开关 G_1 打开，电感处于放磁阶段，相应时段的等效电路如图 5-4-5 所示。

互补驱动方式下电感电流连续，则相应的分段状态微分方程如下：

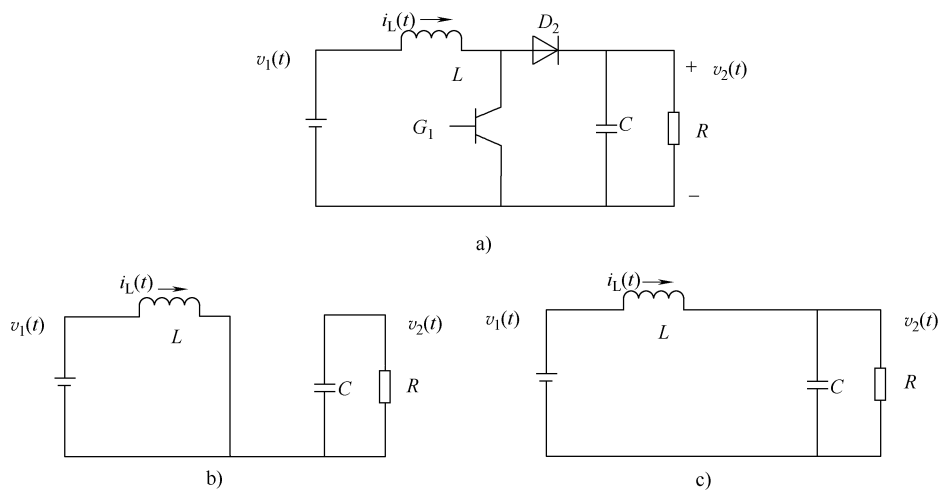


图 5-4-5 双向 DC/DC 变换器 Boost 运行模式等效电路图

开关 G_1 导通状态 ($0 \leq t \leq t_{on}$):

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_1(t) \\ C \frac{dv_2(t)}{dt} = -\frac{v_2(t)}{R} \end{cases} \quad (5-4-1)$$

开关 G_1 关断状态 ($t_{on} \leq t \leq T$):

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_1(t) - v_2(t) \\ C \frac{dv_2(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_2(t)}{R} \end{cases} \quad (5-4-2)$$

根据基本的状态空间平均方法, 对以上两式进行综合, 得到大信号平均方程:

$$\begin{cases} L \frac{d \langle i_L(t) \rangle}{d(t)} = \langle v_1(t) \rangle T_s - d'(t) \langle v_2(t) \rangle T_s \\ C \frac{d \langle v_2(t) \rangle}{d(t)} = d'(t) \langle i_L(t) \rangle T_s - \frac{\langle v_2(t) \rangle T_s}{R} \end{cases} \quad (5-4-3)$$

式中, $d(t) = t_{on}/T$, 表示占空比; $d'(t) = 1 - d(t)$ 。

在复合电源储能时, 双向 DC/DC 变换器相当于图 5-4-6 所示的常规 Buck 变流器运行。电感电流连续, 一个开关周期可以分为 2 个阶段。

在阶段 1, 开关 G_2 闭合, 电感处于充磁阶段; 阶段 2, 开关 G_2 打开时, 电感处于放磁阶段, 相应时段的等效电路如图 5-4-6 所示。

互补驱动方式下电感电流连续, 则相应的分段状态微分方程如下。

开关 G_2 导通状态 ($0 \leq t \leq t_{on}$):

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_2(t) - v_1(t) \\ C \frac{dv_1(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_1(t)}{R} \end{cases} \quad (5-4-4)$$

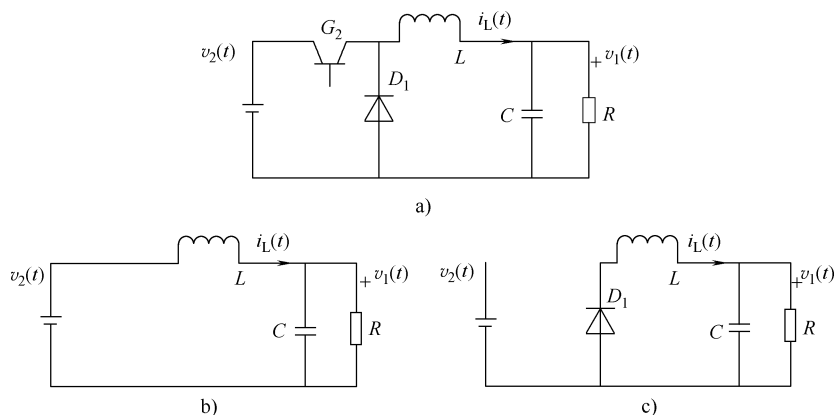


图 5-4-6 双向 DC/DC 变换器 Buck 运行模式等效电路图

开关 G_2 关断状态 ($t_{on} \leq t \leq T$):

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_1(t) \\ C \frac{dv_1(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_1(t)}{R} \end{cases} \quad (5-4-5)$$

根据基本的状态空间平均方法, 对以上两式进行综合得到大信号平均方程:

$$\begin{cases} L \frac{d \langle i_L(t) \rangle T_s}{dt} = d(t) \langle v_2(t) \rangle T_s - \langle v_1(t) \rangle T_s \\ C \frac{d \langle v_1(t) \rangle T_s}{dt} = \langle i_L(t) \rangle T_s - \frac{\langle v_1(t) \rangle T_s}{R} \end{cases} \quad (5-4-6)$$

(2) 小信号模型

为使电源系统的输入输出值达到所需指标, 需要引入反馈控制。自动控制理论中关于控制器的设计方法只适用于线性系统。由于 DC/DC 变换器中包含功率开关器件或二极管等非线性元件, 因此属于非线性系统。但当其运行在某一稳态工作点附近时, 电路状态变量的小信号扰动量之间的关系呈现线性系统特性。尽管电源系统为非线性电路, 但研究它在某一稳态工作点附近的动态特性时, 仍可把它当作线性系统来近似。因此, 建立 DC/DC 变换器线性化小信号模型是反馈控制设计的基础。

在大信号模型的基础上, 叠加较小的干扰信号, 即可获得小信号模型。采用灵活的小信号分析方法, 可转化变换器的非线性, 使其成为一个简单的等效线性电路。小信号分析法既保持了变换器运行性能不变, 又便于采用制动控制理论对变换器进行分析, 设计控制器。

双向 DC/DC 变换器运行于 Boost 模式时的线性化小信号模型如下。

$$\begin{cases} L \frac{d \hat{i}_L(t)}{dt} = \hat{v}_1(t) - D' \hat{v}_2(t) + V_2 \hat{d}(t) \\ C \frac{d \hat{v}_2(t)}{dt} = D' \hat{i}_L(t) - \frac{\hat{v}_2(t)}{R} - I_L \hat{d}(t) \end{cases} \quad (5-4-7)$$



式中, D' ——稳态占空比, $D' = 1 - D$;

V_2 ——高压侧稳态电压, 单位为 V;

I_L ——稳态电感电流, 单位为 A。

由以上小信号模型可得输入至输出的传递函数为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\hat{v}_2(s)}{\hat{v}_1(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D'}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D'^2} \\ \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{v}_1(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{Cs + \frac{1}{R}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D'^2} \end{cases} \quad (5-4-8)$$

控制至输出的传递函数为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\hat{v}_2(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_1(s)=0} = \frac{V_2 \left(D' - \frac{LS}{RD'} \right)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D'^2} \\ \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_1(s)=0} = \frac{V_2 \left(CS + \frac{2}{R} \right)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + D'^2} \end{cases} \quad (5-4-9)$$

双向 DC/DC 变换器运行于 Buck 模态时的线性化小信号模型如下。

$$\begin{cases} L \frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} = D\hat{v}_2(t) + V_2\hat{d}(t) - \hat{v}_1(t) \\ C \frac{d\hat{v}_1(t)}{dt} = \hat{i}_L(t) - \frac{\hat{v}_1(t)}{R} \end{cases} \quad (5-4-10)$$

由以上小信号模型可得输入至输出的传递函数为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\hat{v}_1(s)}{\hat{v}_2(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D}{LCS^2 + \frac{L}{R}S + 1} \\ \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{v}_2(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D \left(CS + \frac{1}{R} \right)}{LCS^2 + \frac{L}{R}S + 1} \end{cases} \quad (5-4-11)$$

控制至输出的传递函数为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\hat{v}_1(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_2(s)=0} = \frac{V_2}{LCS^2 + \frac{L}{R}S + 1} \\ \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_2(s)=0} = \frac{V_2 \left(CS + \frac{1}{R} \right)}{LCS^2 + \frac{L}{R}S + 1} \end{cases} \quad (5-4-12)$$



5.5 复合电源系统工作原理及仿真分析

混合动力有轨电车的车载电源由蓄电池与超级电容组成，并通过双向 DC/DC 变换器升压后与直流母线相连。图 5-5-1 所示为复合电源结构，该结构的优势在于，通过对 DC/DC 变换器的控制可间接控制蓄电池组和超级电容，并通过控制使两种电源的不足得到弥补，更好地发挥优势。

例如，动力电池与超级电容的混合可克服动力电池低比功率、超级电容低比能量的缺点，从而获得高比能量和高比功率。本质上，复合电源系统由两个基本的能量储存装置组成：一个具有高比能量，而另一个具有高比功率。该系统运行状态如图 5-5-2 所示。通过对母线电压、电流的控制，能控制蓄电池和超级电容的输入、输出功率。基于此功能，根据复合电源系统功率流分配方法，能量管理系统能对蓄电池和超级电容进行协调控制，使其在工作中发挥出优势。

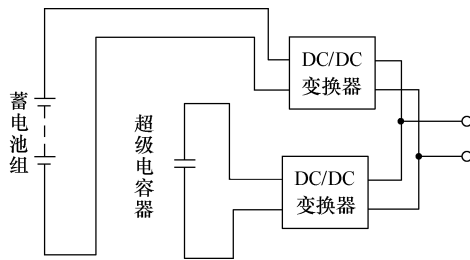


图 5-5-1 复合电源结构

在高功率指令控制下，例如加速和爬坡，这两个能量储存装置都向负载输出功率，如图 5-5-2a 所示。而在低功率指令控制下，例如恒速运行，高比能量的能量储存装置向负载输出功率，高比功率的储能装置不工作，如图 5-5-2b 所示。

在再生制动系统运行时，绝大部分峰值功率由高比功率的能量储存装置吸收，仅有少部分被高比能量的能量储存装置吸收，如图 5-5-2c 所示。以这样的方式，整个系统将比其他任何一者单独作为能量储存装置时，在重量和体积方面都小得多。

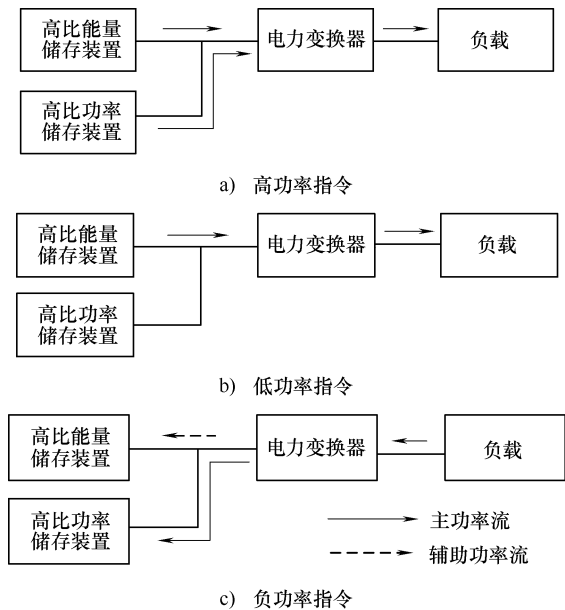


图 5-5-2 复合电源系统基本运行状态



5.5.1 超级电容与蓄电池模型

功率流分配完毕后,根据能量传递效率的估算,超级电容与蓄电池的输出电流 i_c 、 i_L 可知。利用电源模型计算,可得出储能设备的端电压、 SOE 、 SOC 等值。

(1) 超级电容模型

超级电容的简化模型如图 5-5-3 所示。图中,超级电容等效为一个理想电容器 C 与一个较小阻值的电阻(等效串联阻抗 R_s ,一般为几毫欧)串联,同时与一个较大阻值的电阻(等效并联阻抗 R_L)并联的结构。 R_s 模拟热损失和充放电过程中电压的损失, R_L 模拟自放电的泄漏损失。

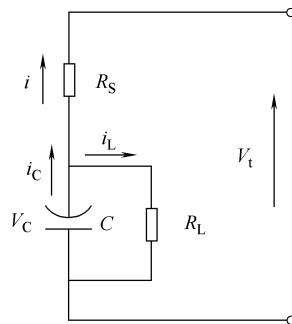


图 5-5-3 超级电容简化模型

在超级电容中给出 3 个参数:电容量(电位 V_c),串联电阻 R_s ,绝缘材料的漏电阻 R_L 。
超级电容的输出电压

$$V_t = V_c + R_s i \quad (5-5-1)$$

超级电容的荷电状态

$$SOE = 100 \left(\frac{V_c}{V_{\max}} \right)^2 \quad (5-5-2)$$

式中, $V_{\max}$ ——超级电容的最高电压,单位为 V。

超级电容的电容量 V_c 为

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \cdot Q}{C}} \quad (5-5-3)$$

式中,

$$Q = \begin{cases} 0.5CV_{\max}^2 & Q > 0.5CV_{\max}^2 \\ 0.5CV_{c0}^2 - \int i_c V_c dt & 0 \leq Q \leq 0.5CV_{\max}^2 \\ 0 & Q < 0 \end{cases} \quad (5-5-4)$$

根据图 5-5-3 可知

$$i_c = i + i_L \quad (5-5-5)$$

式中,

$$i_L = \left| \frac{V_c}{R_L} \right| \cdot \text{sgn}(i) \quad (5-5-6)$$

(2) 蓄电池组模型

蓄电池的结构如图 5-5-4 所示。

蓄电池输出电压为

$$V_{\text{batt}} = E - iR_s \quad (5-5-7)$$

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(-B it) \quad (5-5-8)$$

式中, E_0 ——固定电压,单位为 V;

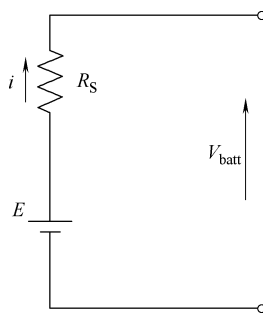


图 5-5-4 蓄电池简化模型

E —无负载电压 (V) R_s —蓄电池串联内阻 (Ω)

V_{batt} —蓄电池输出电压 (V) i —蓄电池输出电流 (A)



K ——极化电压，单位为 V；
 Q ——蓄电池容量，单位为 A · h；
 A ——指数电压，单位为 V；
 B ——指数容量，单位为 A · h

$$it = \frac{1}{3600} \left[\left(\frac{1 - SOC_0}{100} \right) Q 3600 + \int idt \right] \quad (5-5-9)$$

it 的上下界限为蓄电池容量 Q 和 0。

蓄电池 SOC 为

$$SOC = 100 \frac{1 - it}{Q} \quad (5-5-10)$$

(3) 混合电源能输出的最大功率

列车运行时，牵引电机所能输出的最大功率受到两方面的限制，一个是电力牵引系统的最大功率限制（恒功区），另一个是混合电源能输出的最大功率。其中，牵引系统的最大功率限制是在系统设置阶段确定的，而混合电源能输出的最大功率与其运行状态有紧密联系。

假设蓄电池的输出功率截止状态为

$$SOC \leq \overline{SOC} \quad (5-5-11)$$

超级电容的输出截止状态为

$$SOE \leq \overline{SOE} \quad (5-5-12)$$

式中， $\overline{SOC}$ 、 $\overline{SOE}$ 分别为蓄电池和超级电容工作截止状态的阈值。

假设蓄电池能输出的最大功率为

$$\overline{P}_b = v_b i_{b-\max} \quad (5-5-13)$$

超级电容能输出的最大功率为

$$\overline{P}_c = v_c i_{c-\max} \quad (5-5-14)$$

混合动力电源箱能输出的最大功率见表 5-5-1。

表 5-5-1 混合电源最大输出功率

$SOC \backslash SOE$	SOE	
	$\geq \overline{SOE}$	$< \overline{SOE}$
$\geq \overline{SOC}$	$\overline{P}_b + \overline{P}_c$	$\overline{P}_b$
$< \overline{SOC}$	$\overline{P}_c$	0

表 5-5-1 中， SOE 、 SOC 分别表示超级电容的能量状态和蓄电池的荷电状态，第一行与第一列为混合电源的状态信息，对应的内容是混合电源能输出的最大功率。

设混合电源能输出的最大功率为

$$\overline{P}' = \overline{P}_b + \overline{P}_c \quad (5-5-15)$$

电力牵引系统的最大功率限值为 $\overline{P}''$ ，在列车运行过程中，牵引电机能输出的最大功率为

$$\overline{P} = \min(\overline{P}', \overline{P}'') \quad (5-5-16)$$

在仿真分析中，功率限制的目的在于限制某一速度级别下的牵引转矩正输出。在制动回馈时，电源能回收的最大功率对牵引转矩的负输出也有限制。电力牵引系统通常配有制动电阻，能消耗无法吸收的回馈能量，从而保证回馈制动时制动力不受电源功率吸收能力的限



制。因此，此处仿真时只设置了电源输出功率对牵引力大小的限制。

5.5.2 复合电源系统控制方式

(1) 直接并联连接方式

最简单的复合方式就是将超级电容和动力电池直接并联，如图 5-5-5 所示。在这一结构形式中，超级电容简单地相当于一个电流滤波器，它能显著地使动力电池的峰值电流均匀化，并减小了动力电池的电压降。这一结构形式的主要缺点在于其功率流不能主动控制，且超级电容的能量不能充分利用。

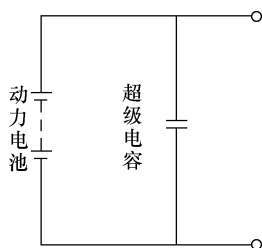


图 5-5-5 动力电池与超级电容的并联连接

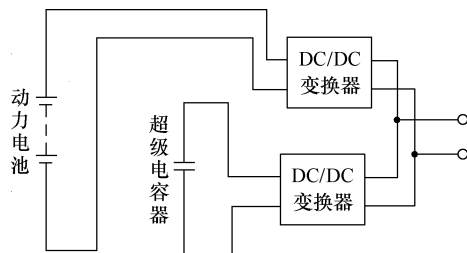


图 5-5-6 具有主动控制功能的复合电源系统

(2) 采用双向 DC/DC 变换器控制方式

图 5-5-6 所示为另一种复合电源结构，其中一个 DC/DC 变换器装配在动力电池与牵引变换器之间，另一个 DC/DC 变换器装配在超级电容与牵引变换器之间。这一设计使动力电池和超级电容可具有不同的电压，两者之间的功率流能主动地加以控制和分配，且超级电容的能量可被充分利用。本书所研究的混合动力系统即采用此复合电源结构。

(3) 动力电池和超级电容的量值设计

假设复合电源系统的整体能量和功率容量恰好满足车辆的能量和功率需求，那么车辆对能量储存装置的能量和功率需求可由能量/功率比描述。能量/功率比 $R_{e/p}$ 定义为

$$R_{e/p} = \frac{E_r}{P_r} \quad (5-5-17)$$

式中， E_r ——车辆所需的能量，单位为 J；

P_r ——车辆所需的功率，单位为 W。

能量和功率需求主要取决于车辆驱动系的设计及其控制策略。当 $R_{e/p}$ 给定时，可设计复合电源系统中的动力电池和超级电容，使该复合电源系统的能量/功率比等于 $R_{e/p}$ ，即应有

$$\frac{W_b E_b + W_c E_c}{W_b P_b + W_c P_c} = R_{e/p} \quad (5-5-18)$$

式中， W_b 和 W_c ——动力电池和超级电容的重量，单位为 kg；

E_b 和 E_c ——动力电池和超级电容的比能量，单位为 W·h/kg；

P_b 和 P_c ——动力电池和超级电容的比功率，单位为 W/kg。

于是，式 (5-5-18) 可写为

$$W_c = k W_b \quad (5-5-19)$$

式中，



$$k = \frac{E_b - R_{e/p} P_b}{R_{e/p} - E_c} \quad (5-5-20)$$

复合电源系统的比能量为

$$E_{spe} = \frac{W_b E_b + W_c E_c}{W_b + W_c} = \frac{E_b + k E_c}{1 + k} \quad (5-5-21)$$

而复合电源系统的比功率为

$$P_{spe} = \frac{W_b P_b + W_c P_c}{W_b + W_c} = \frac{P_b + k P_c}{1 + k} \quad (5-5-22)$$

(4) 双向 DC/DC 变换器的控制方法

双向 DC/DC 变换器各桥臂的上下两功率管采用互补方式驱动, 通过不同的占空比实现电流的双向流动, 因此两个方向电流可统一控制。DC/DC 变换器的控制系统采用的是双闭环结构, 由一个电压外环和一个电流内环组成。电压外环用于稳定输出电压, 电流内环具有限制输出电流和改善动态性能的作用。

双向控制电路结构如图 5-5-7 所示, 基本工作原理如下: 每个模块的高压侧电压 U_1 反馈并与参考值 U_{ref} 相减, 误差经补偿调节器后输出作为电流指令。电流指令经过最大电流 i_{max} 和最小电流 i_{min} 限幅, 作为电流闭环输入。

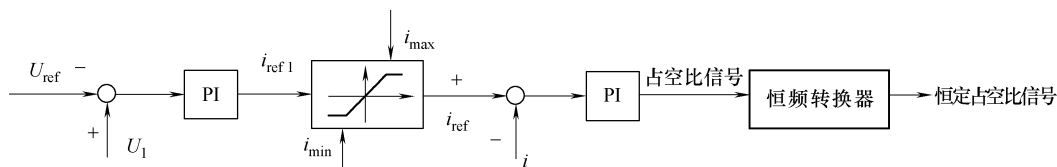


图 5-5-7 双向控制电路结构

变换器的闭环控制可分 3 种情况来讨论:

1) 当高压侧电压 U_1 高于参考电压 U_{ref} 时, 电流指令值为正, 变换器工作在 Buck 模式, 复合电源系统充电储能, 电流指令经过最大、最小电流限幅后, 得到参考电流, 再与高压侧电流比较, 误差经过 PI 调节器, 得到占空比信号输出。

2) 当高压侧电压 U_1 低于参考电压 U_{ref} 时, 电流指令值为负, 变换器工作在 Boost 模式, 复合电源系统放电释放能量, 电流指令经过最大、最小电流限幅后, 得到参考电流, 再与高压侧电流比较, 误差经过 PI 调节器, 得到占空比信号输出。

3) 当高压侧电压 U_1 与参考电压 U_{ref} 相等时, 电流指令值为零, 变换器不工作, 复合电源既不释放能量, 也不吸收能量。

5.5.3 复合电源功率分配控制策略

复合电源功率分配控制策略是一种规则, 它预设列车的控制器中, 根据列车当前状态进行决策, 并将决策信息作为指令发出。驱动系统再根据指令控制 DC/DC 模块功率开关的开闭状态, 以达到控制动力电源的目的。根据目标的不同, 可有不同的控制策略。这里着重考虑以下 2 种供电策略:

➤ 动力电池和超级电容混合供电。如图 5-5-6 所示, 在该策略下, 分别通过两个双向



DC/DC 变换器将动力电池和超级电容连接到直流母线上。动力电池和超级电容可同时工作，两者的输出或输入功率大小通过控制 2 个 DC/DC 变换器即可实现。

► 动力电池和超级电容切换供电。在该策略下，动力电池和超级电容不能同时工作，它们共用一个 DC/DC 变换器，只能通过切换 DC/DC 变换器与它们之间的连接来决定某一时刻是由动力电池还是超级电容供电。

(1) 动力电池、超级电容混合供电功率分配控制策略

该控制策略的执行建立在 DC/DC 变换器同时具有变压和变流能力的基础上，采用规则控制算法，通过对列车的运行模式进行分类，根据不同的工况（平直轨道匀速运行、爬坡、加速、制动），选择不同的功率分配策略。

为描述方便，经调研、比较，考虑一种较合适的策略：低功率指令时，以动力电池作为能量源；高功率指令时，动力电池与超级电容同时作为能量源，超级电容作为主要能量源。根据驾驶指令及列车状态，可得到不同工况下的电源功率需求。具体分配策略：

1) 列车在匀速运行、爬坡、加速等工况下，电源功率需求为正值。

① 通过动力电池 SOC 估计可得到一个此时动力电池可提供的最大输出功率，若该功率能满足需求功率，则通过控制 DC/DC 变换器使动力电池输出相应功率。

② 超级电容作为主能量源，与动力电池同时提供能量。

③ 若在动力电池与超级电容同时供能的情况下仍无法满足功率需求，则动力电池和超级电容以最大能力输出功率，列车降低动力性能要求。

2) 列车在制动或下坡等工况下可进行能量回馈时，需求功率为负功率。

① 若动力电池能吸收全部回馈功率，则优先分配动力电池进行能量吸收。

② 超级电容与动力电池同时吸收回馈功率。

③ 若在动力电池和超级电容同时吸收功率的情况下仍无法吸收全部回馈功率，则超级电容以最大能力吸收回馈能量，控制制动电阻吸收多余功率。

动力电池、超级电容功率分配控制策略如图 5-5-8 所示。图中，横坐标为车速，纵坐标为牵引（制动）功率。 P_{d-max} 为牵引电机最大牵引功率， P_{c-dmax} 为超级电容能提供的最大牵引功率， P_{b-dmax} 为动力电池能提供的最大牵引功率， P_{com} 为指令功率，即期望输出（输入）功率， P_{b-out} 为动力电池实际输出功率， P_{c-out} 为超级电容实际输出功率， P_{b-max} 为牵引电机最大制动功率， P_{c-bmax} 为超级电容的最大制动吸收功率， P_{b-bmax} 为动力电池的最大制动吸收功率， P_{b-in} 为动力电池实际吸收功率，动力电池的吸收功率要小于牵引功率， P_{c-in} 为超级电容实际吸收功率， P_{mech} 为机械制动功率。

A、B、C、D 点表述了该策略的 4 种功率需求情况。

A 点表示指令功率大于动力电池能输出的最大功率，此时可利用超级电容对动力电池功率进行补偿， $P_{com} = P_{b-out} + P_{c-out}$ 。

B 点表示此时功率需求很小，动力电池完全可满足其功率需求，而满足牵引功率需求后多余的功率可选择给超级电容充电， $P_{b-out} = P_{com} + P_{c-in}$ 。

C 点表示此时为联合制动模式（回馈 + 辅助），制动功率需求超过动力电池和超级电容的最大制动吸收功率总和，此时需要其他制动方式进行制动功率补充（这里为机械制动）， $P_{com} = P_{b-in} + P_{c-in} + P_{mech}$ 。

D 点表示回馈制动完全可满足制动功率要求，控制动力电池和超级电容共同吸收制动能



量，即可完成回馈制动。

(2) 动力电池、超级电容切换供电控制策略

图 5-5-9 所示为另一种供电策略：动力电池、超级电容在同一时刻只能单独工作提供能量。该策略需要 DC/DC 变换器对动力电池、超级电容具有切换控制能力和升降压功能，而不存在功率分配问题。其基本控制策略是：低功率需求时使用动力电池供电（平直轨道直线运行等工况），而高功率需求时使用超级电容供电（加速、牵引等工况）。图 5-5-9 中的参数意义与图 5-5-8 中的相同。可以看出，在 A、B、C、D 四种情况下，动力电池和超级电容均单独工作。

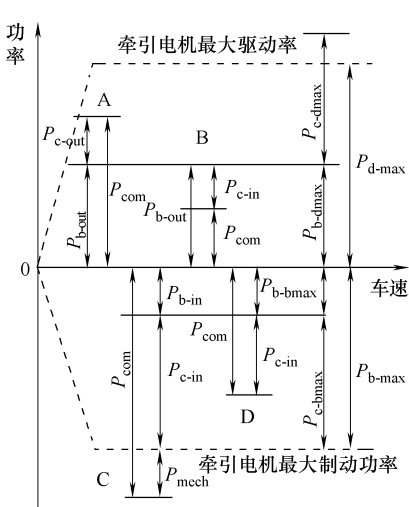


图 5-5-8 动力电池、超级电容功率分配控制策略

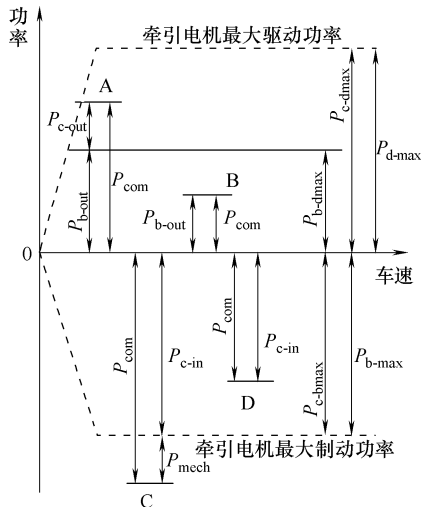


图 5-5-9 动力电池、超级电容切换供电控制策略

图 5-5-8 与图 5-5-9 所示为两种控制策略。混合供电的功率分配控制策略（策略 1），能完全发挥混合电源的高比能量和高比功率优势，并可减少动力电池和超级电容的数量，真正意义上形成了“混合动力”，但控制相对复杂，对 DC/DC 变换器要求较高。而切换供电控制策略（策略 2），使动力电池和超级电容的数量更大，不能形成高比能和高比功率的优势互补效应，但控制简单，对 DC/DC 变换器的要求相对较低。控制策略的选取需要根据多方面因素综合考虑。

根据混合动力有轨电车的实际情况，考虑以下方面：

- 1) 由于电源箱空间有限，必须压缩动力电池和超级电容的数量。策略 1 有利于减少动力电池和超级电容数量。经计算，策略 2 需求的动力电池、超级电容数量约为策略 1 需求数量的 1.5 倍，相比之下，策略 2 需求的动力电池和超级电容数量给电源箱的设计提出了很大挑战。
- 2) DC/DC 变换器的最大电流限制下，采用策略 1 能将电流分担到两个 DC/DC 变换器上，从而有效降低单个 DC/DC 变换器的输出电流，从而最大程度地发挥 DC/DC 变换器的能力。
- 3) 采用策略 1 时，在大部分情况下超级电容的 SOE 保持在较高状态，这样有利于延长



突发大功率需求情况下的工作时间。

综合以上分析，首选策略1作为功率分配策略。

5.5.4 功率流分配策略算法

高功率指令与低功率指令是根据蓄电池组的最大充放电能力来界定的。假设 i_b 为蓄电池组的输出电流， v_b 为蓄电池组的输出电压， i_{db} 为连接蓄电池组的 DC/DC 变换器的输出端电流， i_c 为超级电容输出电流， v_c 为超级电容输出电压， i_{dc} 为连接超级电容组的 DC/DC 变换器的输出端电流， i_{bus} 、 v_{bus} 分别为母线电流和母线电压， i_{b-up} 为蓄电池最大放电电流， i_{b-low} 为蓄电池最大充电电流。根据 DC/DC 变换器的变压比可得到 i_{db} 的最大输出电流 i_{db-up} 和输入电流 i_{db-low} ：

$$\begin{cases} i_{db-up} = \frac{v_b}{v_{bus}} i_{b-up} \\ i_{db-low} = \frac{v_b}{v_{bus}} i_{b-low} \end{cases} \quad (5-5-23)$$

混合电源参数变量定义如图 5-5-10 所示。

功率流分配策略算法如下。

步骤1：输入参数“net”=1时，电网有电，此时动力电池和超级电容均以最大能力充电，蓄电池的最大充电电流为 i_{b-low} ，超级电容为 $i_{c-max} = 400A$ （理论上，超级电容的充电电流可达 2000A，但考虑电网容量非无穷大，限定超级电容的充电电流为 400A）。

于是可得： $i_b = i_{b-low}$ ， $i_c = -i_{c-max}$ 。当输入参数“net”=0时，电网没电，需要由车载混合电源为列车供电，进入步骤2。

步骤2：界定此时的功率需求是高功率指令还是低功率指令。

根据式 (5-5-23) 得到 i_{db-up} 和 i_{db-low} 。

当功率需求

$$\begin{cases} P_n \geq v_{bus} i_{db-low} \\ P_n \leq v_{bus} i_{db-up} \end{cases} \quad (5-5-24)$$

成立时，为低功率指令，表示蓄电池组能单独满足的功率需求。

于是可得：

$$i_{db} = \frac{P_n}{v_{bus}}, \quad i_b = \frac{v_{bus}}{i_b} i_{db}, \quad i_c = 0。$$

当式 (5-5-24) 不成立时，进入步骤3。

步骤3：进行功率流分配。

判断功率需求的正负。当前功率需求下的母线电流值为：

$$i_{bus} = \frac{P_n}{v_{bus}} \quad (5-5-25)$$

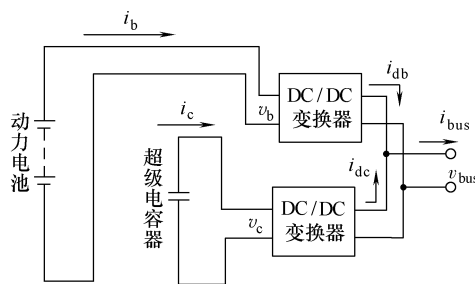


图 5-5-10 混合电源参数定义



当 $i_{bus} > i_{db-up}$ 时, 则认为当前功率需求为正, 否则认为当前功率需求为负。

设置中间变量

$$middle = \begin{cases} i_{db-up}, & i_{bus} > i_{db-up} \\ i_{db-low}, & i_{bus} \leq i_{db-up} \end{cases} \quad (5-5-26)$$

于是可得:

$$i_b = \frac{v_{bus}}{v_b} middle, \quad i_{dc} = \frac{P_n}{v_{bus}} - middle, \quad i_c = \frac{v_{bus}}{v_c} i_{dc}。$$

功率流分配算法完毕。

5.6 混合动力有轨电车运行仿真研究

5.6.1 混合动力仿真软件

混合动力仿真软件的功能模块主要分为车辆参数、电源设置、线路数据、ATC 生成、运行仿真等 5 个部分, 如图 5-6-1 所示。



图 5-6-1 系统主界面

车辆参数模块如图 5-6-2 所示。该模块可设置列车基本参数、电气设备参数、阻力参数和速度控制器参数。列车的基本参数包括整车质量、车轮滚动半径、机械传动系统效率、变速器传动比和惯性质量系数。电气设备参数包括电机额定功率、整车电机数量、电机效率、逆变器效率、DC/DC 变换器效率和整车辅助功率。阻力参数是单位基本阻力公式中的 3 个经验常数。速度控制器参数是 PI 参数。可将设置好的参数保存为列车数据文件, 以便下次直接调用。

电源参数模块如图 5-6-3 所示。该模块可设置动力电池参数、超级电容参数、电网参数和电源控制参数。动力电池参数包括单体动力电池的额定电压、额定容量、初始 SOC、满电荷电压、额定放电倍率、串联内阻、串联数和并联数等。超级电容参数包括单体超级电容的额定容



图 5-6-2 列车参数设置界面

量、额定电压、初始 SOE、截止工作 SOE、最大放电电流、最大充电电流和串并联数等。电网参数包括母线电压和母线最大电流。电源控制参数是供电方式的选择，包括单 DC/DC 变换器切换供电和双 DC/DC 变换器混合供电。

图 5-6-3 电源参数设置界面

线路数据模块如图 5-6-4 所示。该模块采用直接加载线路数据文件的方式。线路数据文件是包括线路概览数据、车站数据、坡道数据、曲线数据的文本格式文件，方便使用者编辑。

ATC 曲线模块如图 5-6-5 所示。该模块生成需设置列车的期望行驶车速、期望驱动加速度和期望制动加速度。设置并保存后就可生成列车运行的 ATC 曲线。

运行仿真模块如图 5-6-6 所示。设置好仿真步长、仿真时长及 PI 迭代步长后可进行列车运行仿真。结果包括列车位移时程曲线、列车牵引力时程曲线、列车速度时程曲线、列车加速度时程曲线、需求功率时程曲线、动力电池 SOC 时程曲线和超级电容 SOE 时程曲线，共 7 种曲线，曲线都可局部放大显示。

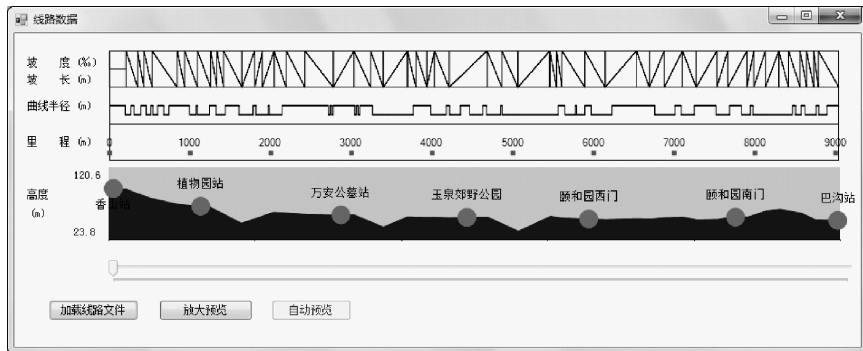


图 5-6-4 线路数据加载界面

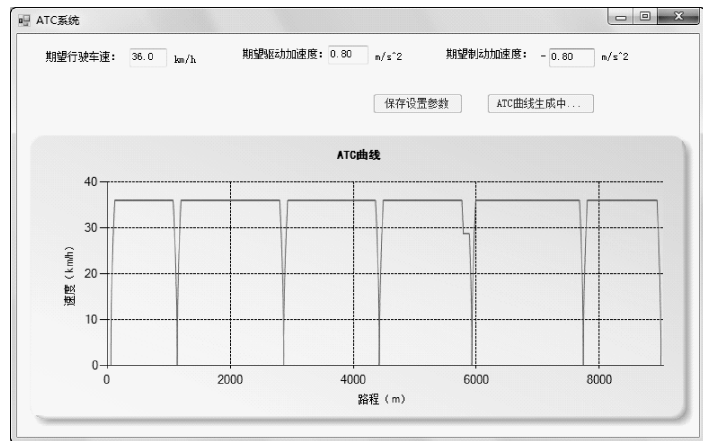


图 5-6-5 ATC 生成设置界面

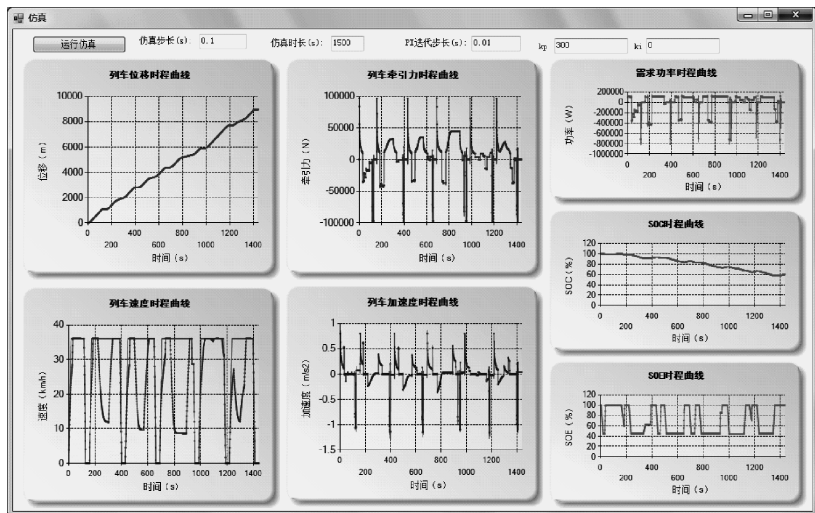


图 5-6-6 运行仿真界面



运行仿真完成后,通过点击菜单“仿真运行”-“回放线路运行”打开线路仿真回放窗口,即可查看运行结果的详细数据动画回放,如图 5-6-7 所示。

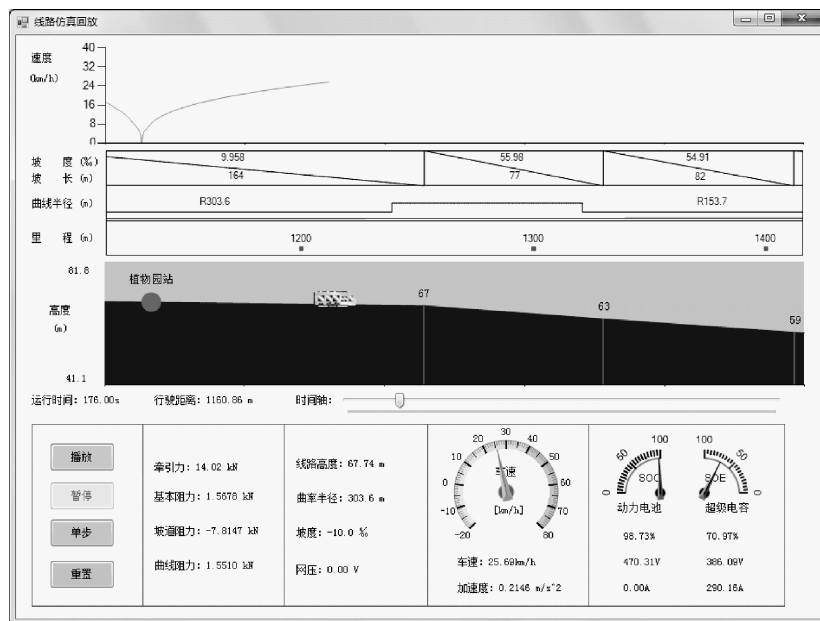


图 5-6-7 线路仿真回放界面

5.6.2 国内某线路的混合动力方案设计

5.6.2.1 输入参数

(1) 线路信息

北京西郊线全线共 7 个停靠站(不包括起点端和终点端),分别是“香山站”“植物园站”“万安公墓站”“玉泉郊野公园站”“颐和园西门站”“颐和园南门站”“巴沟站”。线路平面走向如图 5-6-8 所示。



图 5-6-8 北京西郊线平面走向示意图



设左线（上行线）中香山站为始发站，巴沟站为终点站。右线（下行线）中巴沟站为始发站，香山站为终点站。其中，植物园站左线与右线的公里标不同，其余站点公里标均相同。在停靠站内架设电网，为列车的车载电源充电，列车停车时间 30s。列车进入站台后即刻开始充电，在起动出站台前的一段距离由电网供电，出站后由车载电源供电。

北京西郊线下行线路中坡度信息和弯道信息的具体数据见表 5-6-1 ~ 表 5-6-3。上行线路相关信息类似。

表 5-6-1 北京西郊线（下行）线路停靠站位置信息

出发站	到达站	出发站位置/m	站间距/m
香山站	植物园站	59.5	1080.989
植物园站	万安公墓站	1140	1780.541
万安公墓站	玉泉郊野公园站	2918	1491.663
玉泉郊野公园站	颐和园西门站	4420	1507.686
颐和园西门站	颐和园南门站	5925	1823.062
颐和园南门站	巴沟站	7745	1261.011
巴沟站		9012	

表 5-6-2 北京西郊线（下行）线路坡度信息

位置/m	坡度/‰	位置/m	坡度/‰	位置/m	坡度/‰
59.5	0	4013	3	7007	-2
193	0	4263	-2.42	7148	-1.99
368	-35	4388	2	7299	-17.89
515	-46	4680	2	7489	3
858	-23	4862	-49	7662	18.72
1253	-10	5061	-50	7900	3
1663	-56	5458	50	8128	35.55
1990	50	5607	-16	8296	12.19
2470	-7	5777	-4	8559	-20
3063	-3	6140	-3.5	8728	-50
3393	-45	6481	3	9012	-4
3693	45	6681	-3		
3878	-4	6845	12		

表 5-6-3 北京西郊线（下行）线路弯道信息

位置/m	曲线半径/m	位置/m	曲线半径/m	位置/m	曲线半径/m
0	inf	668.027	inf	1780.764	303.6
191.303	inf	732.625	396.4	1816.283	inf
260.726	800	987.709	inf	1964.285	996.4
298.791	inf	1073.172	296.4	1981.31	inf
385.142	353.6	1088.386	inf	2138.287	996.4
449.608	inf	1239.402	303.6	2761.546	inf
505.46	396.4	1320.877	inf	2811.526	2003.6
533.808	inf	1433.772	153.7	2834.647	inf
590.76	403.6	1604.22	inf	2884.627	2003.6



(续)

位置/m	曲线半径/m	位置/m	曲线半径/m	位置/m	曲线半径/m
3034.447	inf	4846.897	153.7	7515.553	inf
3084.426	2003.6	4866.848	inf	7683.754	153.7
3107.548	inf	5560.004	446.4	7832.471	inf
3157.527	2003.6	5640.75	inf	7942.159	500
3258.351	inf	5773.072	603.6	7973.552	inf
3763.339	386.4	5789.43	inf	8465.605	300
3982.321	inf	5891.829	63.7	8502.235	inf
4174.824	303.6	5968.895	inf	8570.663	1004.8
4211.639	inf	6228.475	753.6	8618.503	inf
4347.111	296.4	6758.155	inf	8761.033	195.2
4462.853	inf	7008.373	226.3	8789.317	inf
4624.103	496.4	7085.038	inf	8907.208	150
4670.872	inf	7245.927	303.6	9012	inf

注：表中的 inf 表示无穷大，曲线半径为无穷大，即为直线。

本报告考虑了列车运行时的曲线阻力和坡道阻力，坡道阻力不再赘述。采用的曲线阻力计算公式如下：

$$\omega_r = \frac{A}{R} \quad (\text{N/kN}) \quad (5-6-1)$$

式中， A ——经验常数，取 $A = 600$ ；

R ——曲线半径，单位为 m 。

为保证列车安全通过曲线，列车在曲线运行时有速度限制。曲线限速的计算公式为：

$$V_{\max} = 4.3 \sqrt{R} \quad (5-6-2)$$

式中， $V_{\max}$ ——列车最大速度值，单位为 m/s ；

R ——曲线半径，单位为 m 。

本节主要研究混合动力有轨电车在北京西郊线运行时，车载电源配置是否满足要求。

(2) 列车相关参数

仿真采用车型为唐山轨道客车有限公司设计的 100% 低地板有轨电车，编组采用“3 动 1 拖”结构，整车质量为 84t (AW3，载员 474 人)。每辆动车配有 4 个牵引电机，全车总共 12 个牵引电机，每台牵引电机额定功率 50kW，每辆车辅助功率为 10kW。

单辆动车配有一套电源箱，超级电容与蓄电池的配置为“2C1B”，即混合动力电源箱由 2 组超级电容 (Maxwell_165F) + 1 组蓄电池 (苏州星恒 40A · h) 组成。混合电源系统由超级电容、蓄电池和 DC/DC 变换器组成。混合电源输出电压为 750V (与电网母线电压相同)。蓄电池初始输出电压为 480V，最大放电电流 200A，最大充电电流为 40A，设定当 SOC 下降至 30% 时停止工作。超级电容初始输出电压为 480V，最大放电电流设定为 700A，最大充电电流为 300A，设定当 SOE 下降至 45% 时停止工作。

DC/DC 变换器的低压侧接电源，高压侧接直流母线，直流母线的电压为 750V。轮周功率通过传动系统、牵引电机、牵引变换器、DC/DC 变换器到电源的功率传递效率约为 0.68。



功率分配策略为：低功率指令时蓄电池为主要能量提供者，高功率指令时超级电容为主要能量提供者。

5.6.2.2 计算分析

考虑地下线和高架线架设接触网，交叉路口停车 60s 的情况。其他仿真参数见表 5-6-4。

表 5-6-4 参数表

电机功率	50kW	额定行驶速度	36km/h
蓄电池最大放电电流	120A	混合电源配置	2C1B
蓄电池充电电流	40A	列车质量	80t
超级电容最大放电电流	700A	列车起动加速度	0.8m/s^2
超级电容充电电流	160A	列车制动加速度	-1.2m/s^2

混合电源配置是 2C1B，1B 为 135 个 $40\text{A} \cdot \text{h}$ 锂电池。站台长度为 72m。

(1) 列车下行（右线行驶）

由巴沟站出发，最终到达香山站。仿真结果如图 5-6-9 和图 5-6-10 所示。可以看出，到终点站时蓄电池 SOC 下降到大约 68%。列车顺利驶完全程，运行时间约为 1318s。

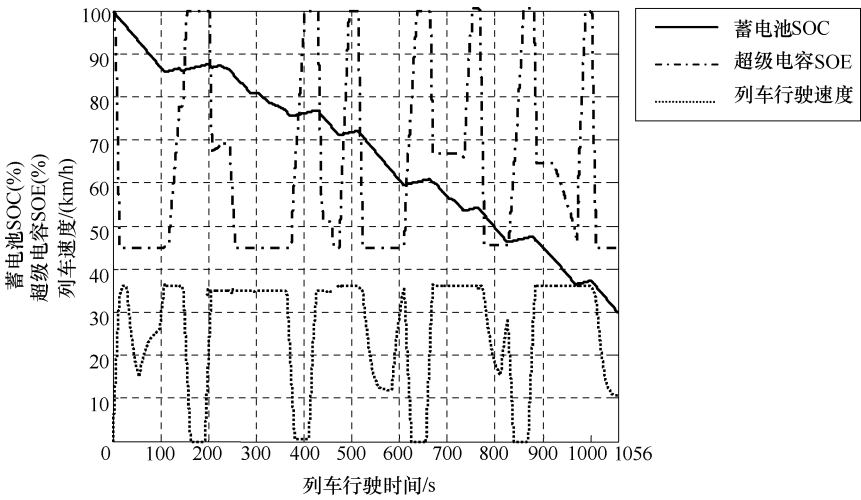


图 5-6-9 电源能量状态、车速与时间关系曲线

从图 5-6-11 中可以看出，在一些上坡区段，列车速度下降，不能以期望速度运行。但较之前没有接触网的工况，列车速度下降得较少。除在终点站前的那个坡道速度下降到约 10km/h，其他坡道因有接触网速度最低也在 20km/h 左右。

由图 5-6-12 可知，列车的起动加速度在 0.8m/s^2 左右，制动加速度达到 -1.2m/s^2 ，加速减速性能良好。超级电容可满足列车加速时的能量需求。

图 5-6-13 ~ 图 5-6-15 是列车运行过程中，电源箱及蓄电池、超级电容各自的输出电流大小变化情况。从图中可以看出，蓄电池的最大输出电流接近 120A，超级电容的最大输出电流达到约 700A，都在允许范围之内。

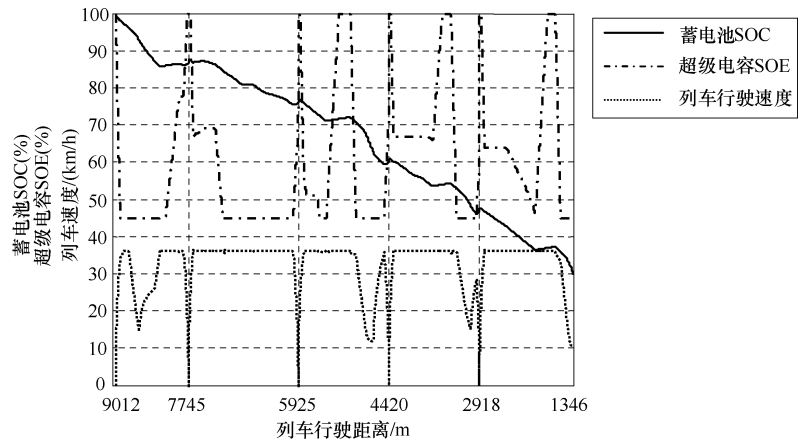


图 5-6-10 电源能量状态、车速与行驶距离关系曲线

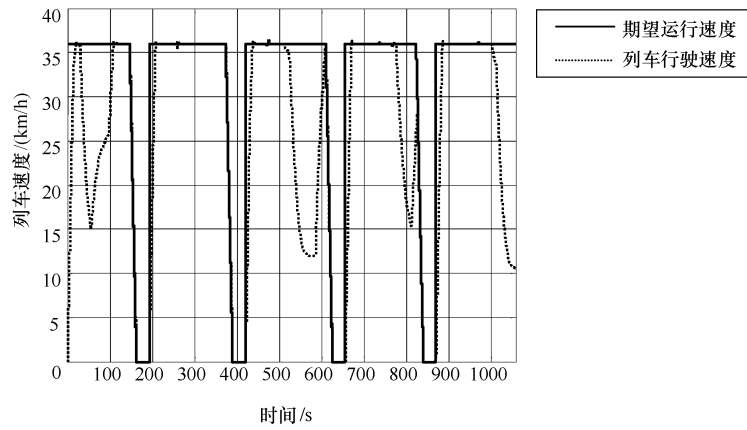


图 5-6-11 列车速度与期望速度关系曲线

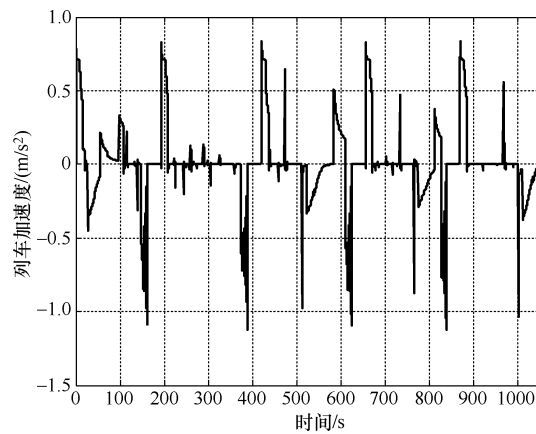


图 5-6-12 列车加速度曲线

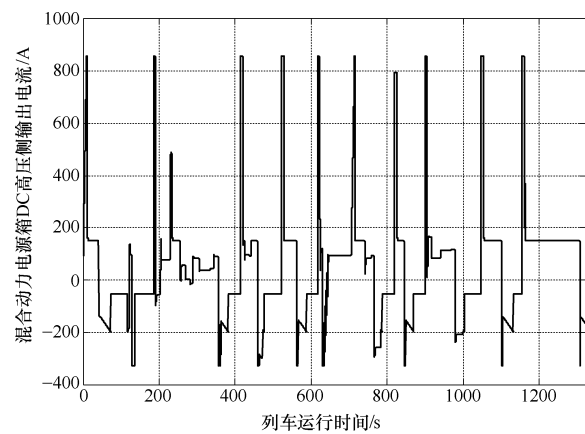


图 5-6-13 混合电源箱 DC 高压侧输出电流曲线

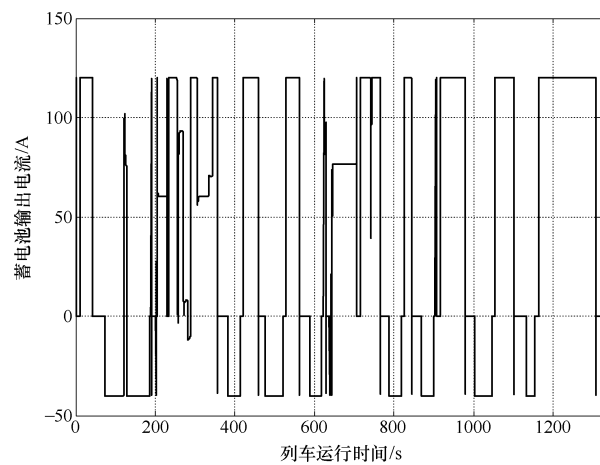


图 5-6-14 蓄电池输出电流曲线

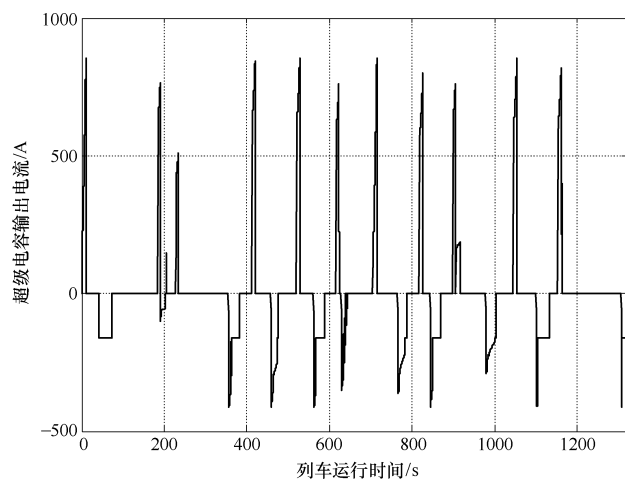


图 5-6-15 超级电容输出电流曲线



由图 5-6-16 可以看出列车运行过程中弯道阻力和坡道阻力对速度的影响。列车的续航速度为 36km/h，在线路曲线限速范围内，因此弯道对列车速度影响不大。坡道对列车速度影响比较大，在坡度大的地方列车速度降低。由于地下线和高架线架设了接触网，列车在有接触网的坡道行驶时性能下降较少，没有接触网的坡道上行驶时性能下降较大。

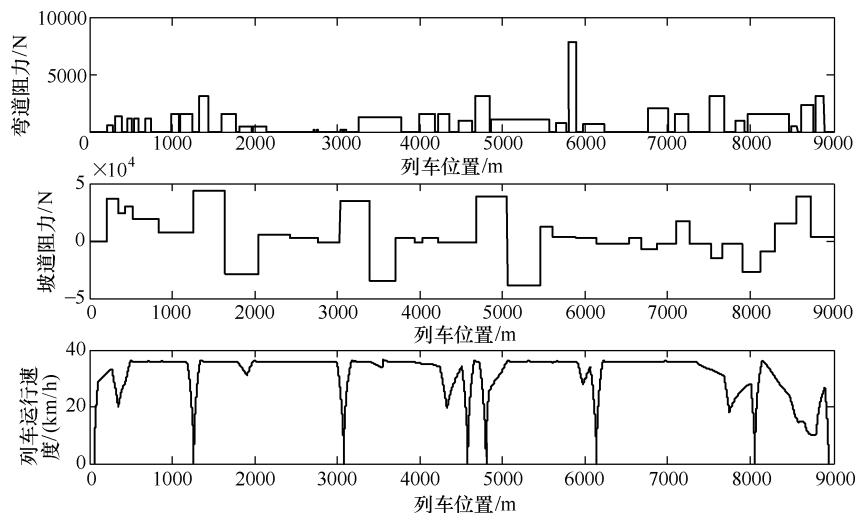


图 5-6-16 线路弯道阻力、坡道阻力和列车速度曲线

(2) 列车上行（左线行驶）

由香山站出发，最终到达巴沟站。仿真结果如图 5-6-17 和图 5-6-18 所示。可以看出，列车在左线行驶到达终点站时蓄电池 SOC 下降到 78% 左右，列车运行时间约为 1218s。地下线和高架线架设接触网后，减少了蓄电池的能量消耗，蓄电池 SOC 在到达终点时保持较高状态，列车运行性能有所提高，运行时间变短。

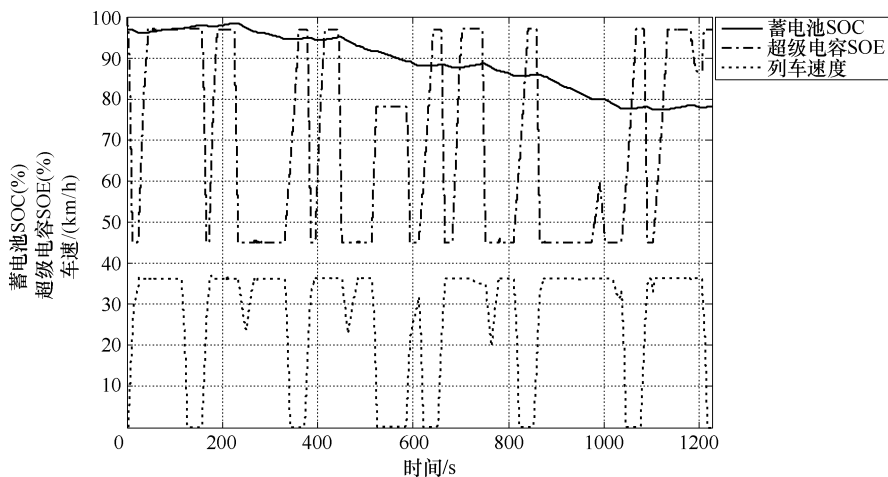


图 5-6-17 电源能量状态、车速与时间关系曲线

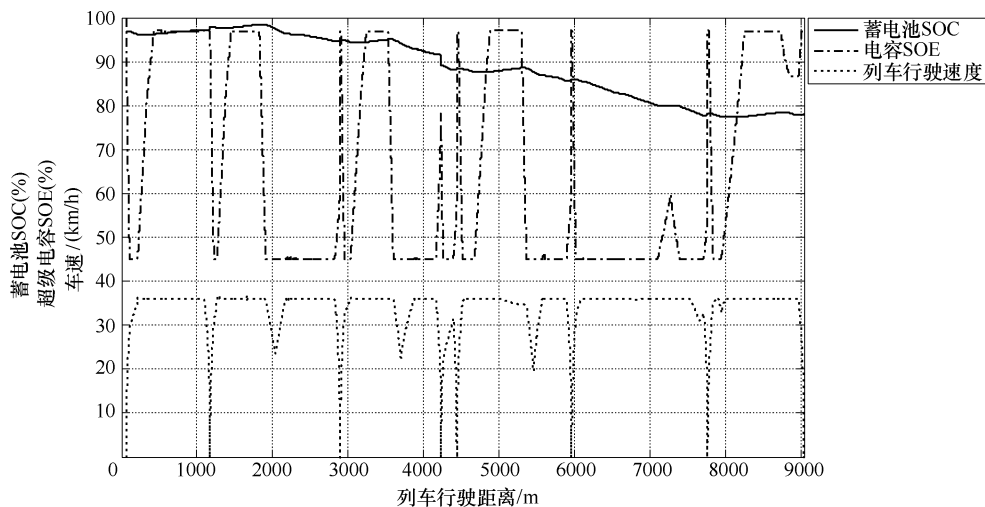


图 5-6-18 电源能量状态、车速与行驶距离关系曲线

从图 5-6-19 中可以看出，在一些上坡区段，列车速度下降，不能以期望速度运行。但较之前面没有接触网的工况，列车速度下降得较少，最低时大约为 20km/h。

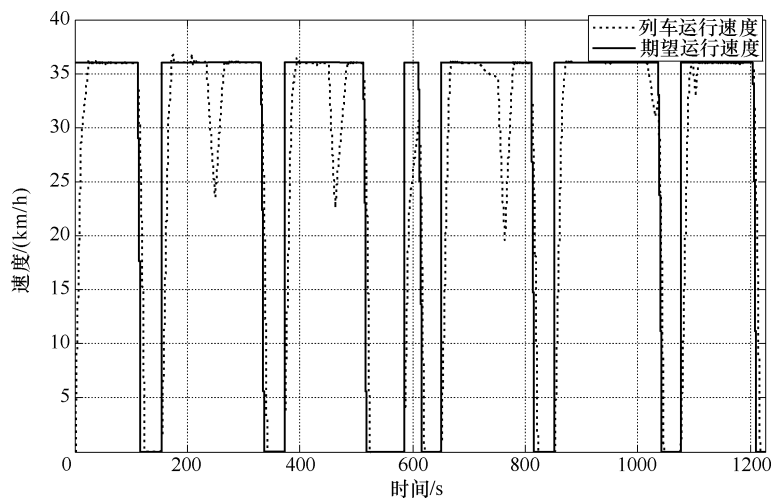


图 5-6-19 列车速度与期望速度关系曲线

图 5-6-20 ~ 图 5-6-22 所示为列车运行过程中，电源箱及蓄电池、超级电容各自的输出电流大小变化情况。从图中可以看出，蓄电池的最大输出电流接近 120A，超级电容的最大输出电流达到约 700A，都在允许范围之内。

由图 5-6-23 可以看出列车运行过程中弯道阻力和坡道阻力对速度的影响。列车的续航里程为 36km/h，在线路曲线限速范围内，因此弯道对列车速度影响不大。坡道对列车速度影响比较大，在坡度大的地方列车速度降低。由于地下线和高架线架设了接触网，列车在上坡时性能下降较少。

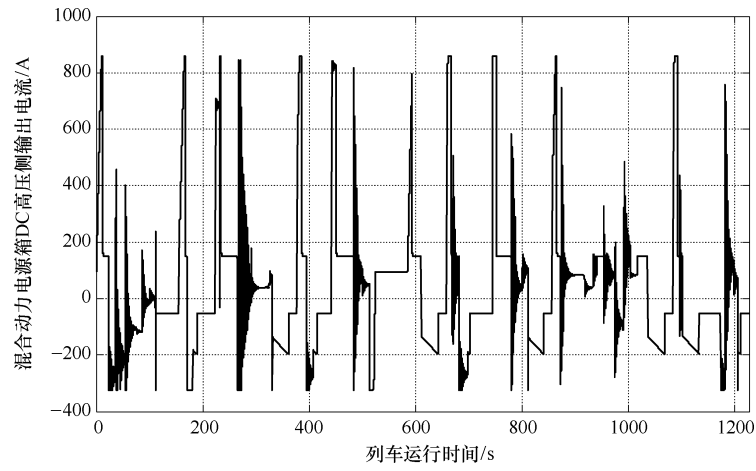


图 5-6-20 混合电源箱 DC 高压侧输出电流曲线

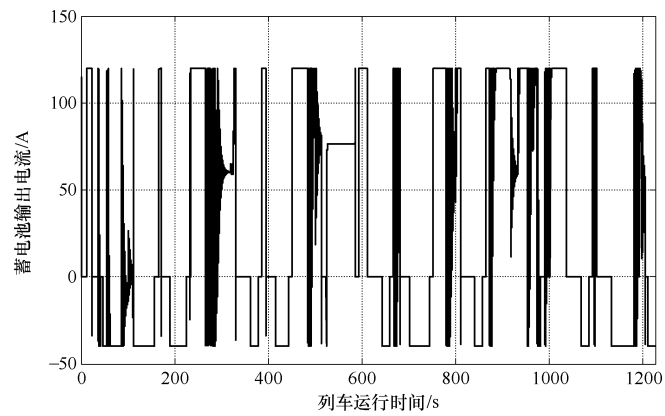


图 5-6-21 蓄电池输出电流曲线

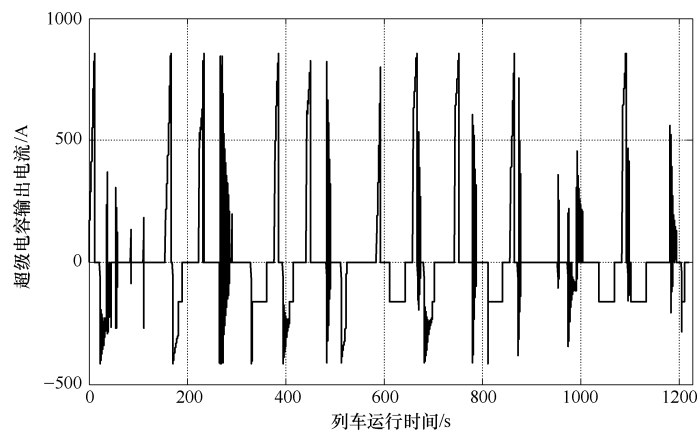


图 5-6-22 超级电容输出电流曲线

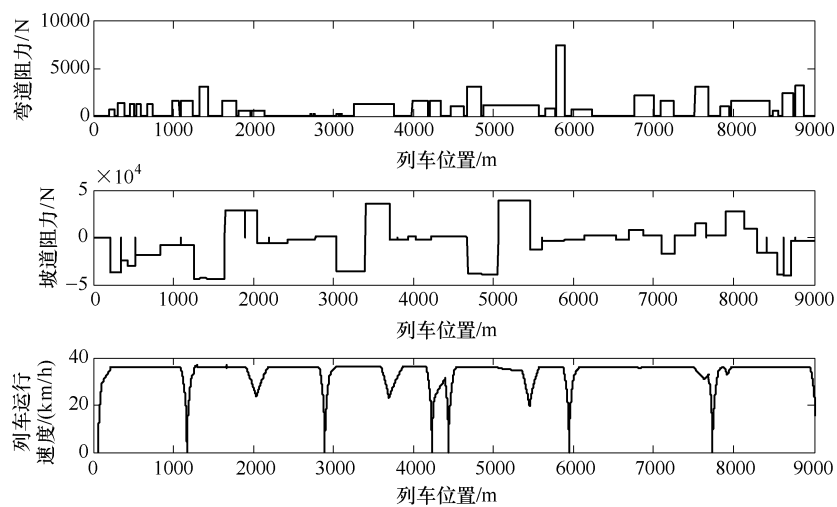


图 5-6-23 线路弯道阻力、坡道阻力和列车速度曲线

由图 5-6-23 可知，地下线和高架线架设接触网的情况下，上述混合动力系统配置可满足列车在北京西郊线的正常行驶，运行状况良好。



燃料电池有轨电车技术

本章所讲的混合动力有轨电车采用了燃料电池 + 超级电容 + 动力电池供电技术，可实现真正意义上的全线无网，减少有害物质的排放，同时降低运行能耗，是一种极有发展前景的新能源有轨电车。

6.1 氢燃料电池轨道车辆效益分析

6.1.1 社会经济效益

1) 弥补国内氢燃料有轨电车行业产业化发展的空白。该项目引进国外具有最先进水平的燃料电池技术，能弥补国内氢燃料有轨电车行业产业化发展的空白，实现氢燃料有轨电车行业跨越式发展。

2) 推进国家绿色氢能经济发展。氢能作为 21 世纪的绿色能源，在世界各国得到广泛关注。燃料电池通过氢气和空气的电化学反应，完全零污染排放地产生电能。它作为氢能经济发展的应用技术载体，应用于客车等公共服务运输行业，能替代传统的高污染柴油发动（电）机和汽油发动（电）机，提供清洁、高效、节能的车辆动力系统解决方案。

3) 有效促进区域经济发展。可推动我国的氢能和氢燃料电池事业发展，并带动国内及国际燃料电池商业应用市场。同时可新增就业岗位，带动代工生产、包装材料、物流、生产设备等相关产业发展，提供大量间接就业机会，对区域经济发展具有积极的推动作用。

目前，燃料电池行业仍处在市场初级阶段，当达到商品化、产业化量产阶段时，燃料电池有轨电车/客车的成本会大幅降低，可与内燃机客车的成本相当。

在我国对燃料电池工业投资强度不足和定位不准的情况下，借助巴拉德等公司已经取得成功的燃料电池技术，在其他国家尚未形成燃料电池规模产业化的情况下，正是由我国率先实现燃料电池规模化生产、市场推广应用的最好时机。目前，资本运作燃料电池已经开始发力，燃料电池未来的市场价值将与现在的家电、手机一样，具有巨大的提升空间。因此当下正是发展氢燃料电池客车/轨道车辆最好的时机和最佳的切入点，也是投资的最佳时机。

6.1.2 节能减排效益

控减 PM2.5、降低大中型城市汽车尾气造成的大气污染，是摆在我国政府面前的头等大事，不仅关系着亿万民生，更关乎子孙后代。但目前还没有找到最好的根治办法。而燃料电池的研发和使用可使这一问题迎刃而解。由于氢燃料电池发电时排放的是水，不会产生碳排放，节能减排效果最彻底。例如，燃料电池有轨电车运行过程中使用氢气和空气发电，排放



物只有水，实现了真正意义的零排放。以每列混合动力有轨电车平均功率 150kW，每天平均运行 12h 计算，每年可减少二氧化碳排放 500t/列，对 40 列有轨电车运行的电车线路，每年可减少碳排放量达到 2 万 t，环保效应非常明显。同时，燃料电池的发电效率比内燃机高 10% 以上，超级电容也可回收电车制动能量，具有良好的节能效应。

此外，由于汽车油耗已占石油能源用量的 50%，燃料电池作为新型高效、节能环保、可持续再生性能源资源，具有越来越重要的战略意义。率先实现燃料电池产业化，对我国实现第三次工业革命、经济转型和能源转型有着极其重大的意义。

6.2 混合动力系统组成及技术参数

本章介绍的燃料电池有轨电车由 3 个模块组成，其中 2 个模块装有动车转向架，一个模块装有拖车转向架。图 6-2-1 所示为有轨电车车辆编组方案。

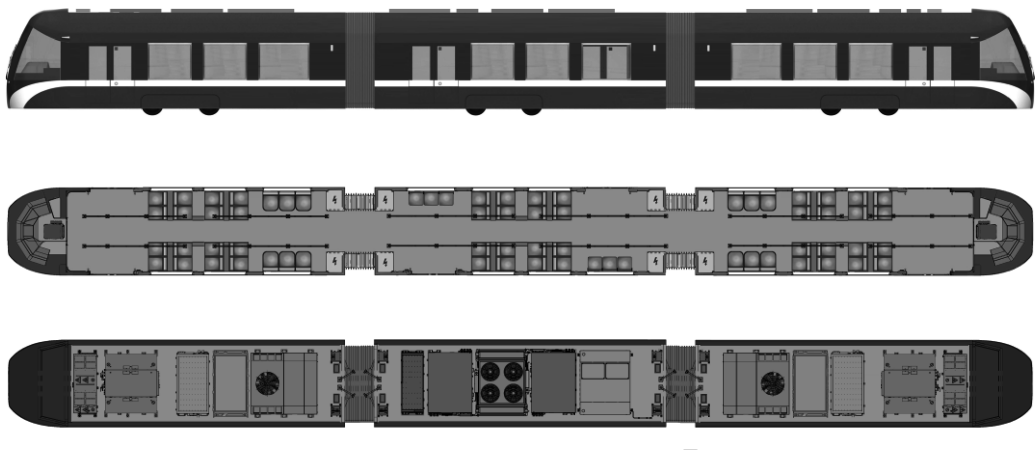


图 6-2-1 有轨电车车辆编组方案

编组方式：- Mc + T + Mc -
Mc：安装动力转向架和司机室的动车模块。
T：安装拖车转向架和燃料电池系统的拖车模块。
+：风挡铰接结构。
-：前端车钩。
有轨电车总体技术指标见表 6-2-1。

表 6-2-1 有轨电车总体技术指标

环境温度	- 25 ~ 50℃
车辆编组	- Mc + T + Mc - ， 100% 低地板
变换器	DC750V（500 ~ 900V）
驱动电机	8 × 110kW
轴重	≤12t



(续)

续驶里程	> 40km
车辆最高运行速度	60km/h
载客量	347 人

有轨电车主要技术参数见表 6-2-2。

表 6-2-2 有轨电车主要技术参数

编组方式	- Mc + T + Mc -
轨距	1435mm
最小平面曲线半径	19
轴重	12t
列车自重	47t
列车车体长度	31075mm
车钩高度	460mm
车辆高度	3500mm
车体宽度	2650mm
客室内净高	2210mm
固定轴距	1850mm
轮径（新/旧）	600/540mm
车体强度	EN 12663 P V
供电方式	燃料电池、超级电容、动力电池
最高运行速度	60km/h
起动加速度	$\geq 1.2 \text{ m/s}^2$
常用制动减速度	1.1 m/s^2
紧急制动减速度	2.5 m/s^2

6.3 混合动力系统详细设计方案

燃料电池混合动力车辆的能量系统包括燃料电池、超级电容和动力电池，车辆以超级电容和动力电池组作为能量回收装置。车辆制动时，优先将制动能量存储在超级电容和动力电池中，以备车辆牵引或辅助设备使用。车辆运行时，以燃料电池、超级电容和动力电池作为驱动电源。车辆停站或回库时，若超级电容和动力电池电量不足，则由燃料电池为超级电容和动力电池充电，以提供车辆起动所需能量。

6.3.1 车辆设备布局优化设计

混合动力电源箱采用模块化设计，Mc 车包含双向 DC/DC 电源电池箱（内有一个双向



DC/DC 动力电池模块、一个双向 DC/DC 超级电容模块、动力电池组及系统控制单元等) 及超级电容箱 (内有超级电容组及能量管理系统)。Tp 车全部为燃料电池系统。车顶设备布局如图 6-3-1 和图 6-3-2 所示。

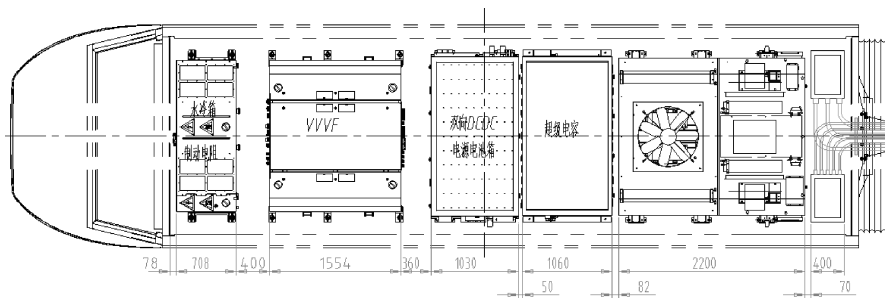


图 6-3-1 Mc 车车顶布置

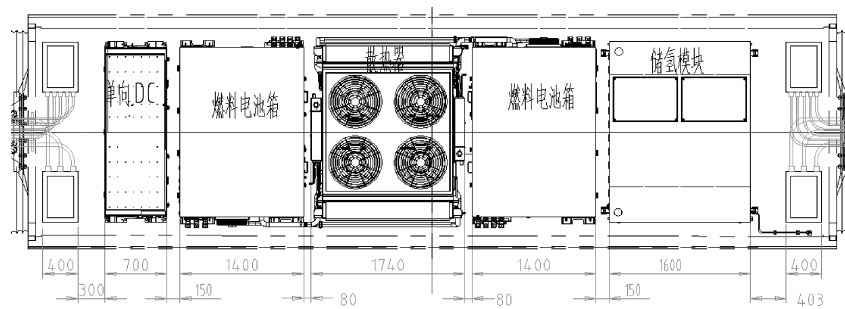


图 6-3-2 T 车车顶布置

- 1) 每套混合动力系统包括一个双向 DC/DC 电源电池箱和超级电容箱 2 个箱体，对称布置于 2 个 Mc 车车顶中部，便于车辆布线和重量管理。
- 2) 动力电池箱避开空调系统出风口，以免受到空调系统较高出风温度的影响。
- 3) 空调机组布置于 Mc 车二位端，方便与中间车的燃料电池系统进行余热交换。
- 4) 2 套燃料电池系统布置于 T 车车顶，对称布置于散热器两侧，便于对供电、供氢系统管路进行设计。
- 5) 储氢系统布置于 T 车 (中间车) 车顶，为 2 套燃料电池系统提供氢气。
- 6) 每辆车车顶设备电气接口，高压线布置在一侧，低压线布置在另一侧，方便车辆布线。
- 7) 制动电阻、水冷系统集成为一体的箱体和牵引变换器箱相邻布置于 Mc 车 (头车) 一位端。

6.3.2 混合动力电源箱 DC/DC 主要技术参数

- 1) 当斩波器 A (动力电池 DC/DC) 作为充电机对动力电池充电时。
输入特性：



主电压：DC 750V（范围 DC 712 ~ 788V，来自燃料电池单向斩波器）
控制电压：DC 24V（-30%~25%）
输出特性：
输出电压：DC 331V（范围 DC 280 ~ 396V）
输出电流：80A

采用恒流充电方式，当电压浮充到 DC 396V 时自动切断输出停止充电。

2) 当斩波器 A（动力电池 DC/DC）作为供电电源对外放电时。

输入特性：

主电压：DC 331V（范围 DC 280 ~ 396V，来自动力电池）
额定输入电流：80A
最大输入电流：120A（1min）
控制电压：DC 24V（-30%~25%）
输出特性：DC 750V × (1 ± 5%)

3) 当斩波器 B（超级电容 DC/DC）作为充电机对超级电容充电时。

主电压：DC 750V（范围 DC 712 ~ 788V，来自单向燃料电池斩波器）
控制电压：DC 24V（-30%~25%）
输出特性：
输出电压：DC 528V（范围 DC 200 ~ 528V）
持续充电电流：300A

4) 当斩波器 B（超级电容 DC/DC）作为供电电源对外放电时。

输入特性：

主电压：DC 528V（范围 DC 200 ~ 528V，来自超级电容）
输入最大电流：700A
控制电压：DC 24V（-30%~25%）
输出特性：DC 750V × (1 ± 5%)

6.3.3 超级电容组技术参数

一套超级电容组配置为 528V、45F，单个模块超级电容参数见表 6-3-1。

表 6-3-1 超级电容参数

厂家	Maxwell 或性能不低于 Maxwell 的同类产品
型号	BMOD0615 或性能不低于该型号的同类产品
额定容量/F	165
串并联数目	11 串 3 并
电容量容差 (%)	-0.2 ~ 0.2
额定电压/V	48
最低工作电压/V	28.8
浪涌电压/V	50.4
最大电流/A	98（持续）；1900（1s）



(续)

可用比功率密度/W/kg	3300
最大储存能量/W · h	52. 8
比能量密度/W · h/kg	3. 9
最大漏电流/mA	5. 2
重量/kg	13. 9
外形尺寸/mm	418 × 194 × 179
运行温度/℃	- 40 ~ 70
寿命/年	10
内阻/mΩ	6. 3
放电深度 (%)	100
充放电次数/次	1000000

6.3.4 动力电池组技术参数

一套动力电池电压、容量分别为 331V、20A · h，单个模块动力电池主要技术参数见表 6-3-2。

表 6-3-2 动力电池主要技术参数

串并联数目	144 串 2 并
单体额定电压	2. 3V
单体额定容量	10A · h
单体内阻	≤1. 2mΩ
放电截止电压	1. 5V
最大充电电压	2. 8V
动力电池组持续放电电流	80A
动力电池组最大放电电流	120A (1min)
外形尺寸	219mm × 126mm × 6mm
充电方法	CC/CA
工作温度范围	- 10 ~ 55℃
环境温度范围	- 20 ~ 45℃
循环寿命	8000 次

6.3.5 燃料电池系统技术参数

单套燃料电池系统的主要技术参数见表 6-3-3。



表 6-3-3 燃料电池系统的技术参数

参 数	数 值	参 数	数 值
氢气的储存量/kg	最大 14	水蒸气的额定质量分数 (%)	21
单电池数量/个	735	燃料 (H_2) 的额定压力/bar	1.3
开路电压/V	735	空气的额定压力/bar	1
电流 1A 时的电压/V	710	空气的额定流速/(L/min)	5400
额定电压/V	540	额定运行温度/ $^{\circ}C$	80
最小电压/V	525	电堆额定效率 (%)	50
额定电流/A	240	燃料电池响应时间/s	3
最大电流/A	320	氧气的最大利用率 (%)	80
燃料 (H_2) 的额定质量分数 (%)	99.999	燃料电池堆数量/个	2
O_2 的额定质量分数 (%)	21	燃料电池堆额定功率/kW	150

燃料电池系统的输出特性与环境温度、电堆工作寿命等因素密切相关,图 6-3-3 所示为燃料电池系统在寿命开始时和寿命终结时的系统输出特性曲线,图中横坐标电流是燃料电池电堆输出电流,该电流数值可通过燃料电池控制器(FCCU)发送给车辆控制器。寿命开始时,燃料电池电堆输出电压较高,系统净输出功率较高,可接近 140kW。寿命终结时,由于电堆输出电压衰减,系统净输出功率降低到 110kW 左右。其中,净输出功率为电堆功率扣除空压机、水泵、散热风机等所有辅机功耗后的输出功率。

图 6-3-4 所示为燃料电池系统净输出功率与主要内耗功率之间的关系。系统的主要内耗包括空压机功耗、水泵功耗、散热器功耗及电控系统功耗等。空压机功耗在所有辅机功耗中占比最大,达 12% 左右。散热器功耗受环境温度影响较大,如果环境温度高,则散热器功耗可达 6% 左右。电控系统功耗包括通风风机、氢气循环泵、电源、电磁阀、传感器、控制器、电路元件等所有功耗,这些功耗占比较小,但种类繁多,且随不同工况条件波动较大,按固定功率 2kW 考虑。

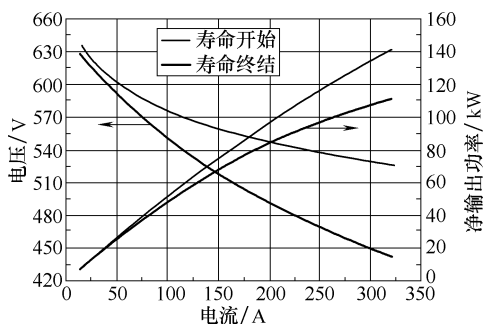


图 6-3-3 燃料电池箱系统输出特性曲线

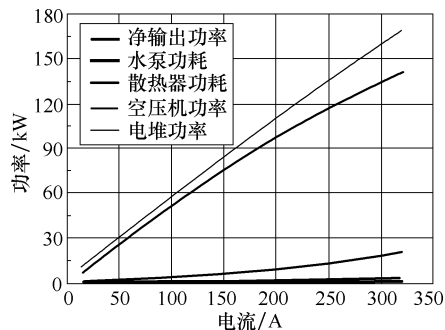


图 6-3-4 燃料电池系统净输出功率与内耗



图 6-3-5 中列出了燃料电池系统效率曲线。电堆效率指燃料电池电堆利用氢气发电的能量转化热力学效率，电效率指燃料电池系统输出净功率与电堆输出功率的比值，总效率是电堆效率与系统电效率的乘积，反映了燃料电池系统输出的总电能与输入的燃料化学能之间的能量转化效率。可以看到，系统总效率在整个工作电流曲线都高于 40%，在较低电流下效率更高，超过 45%。

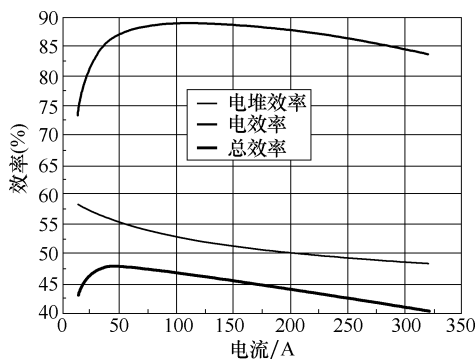


图 6-3-5 燃料电池系统效率

6.4 混合动力系统匹配设计与牵引特性分析

6.4.1 牵引特性分析

对燃料电池/超级电容 100% 低地板有轨电车牵引特性进行分析，结果表明，有轨电车满足持续运行速度大于 60km/h 的要求。

1) 燃料电池按持续输出 210kW 功率计算（春秋季工况，空调不工作）。考虑到辅机工作引起的功耗损失，具体特性曲线如图 6-4-1 ~ 图 6-4-4 所示。在平直道上，列车可加速至 60km/h 以上，满足指标要求，需运行 21.7s，运行距离 223m。在 3% 坡道上，列车最高可加速至 59km/h。在 5% 坡道上，列车最高可加速至 57km/h。

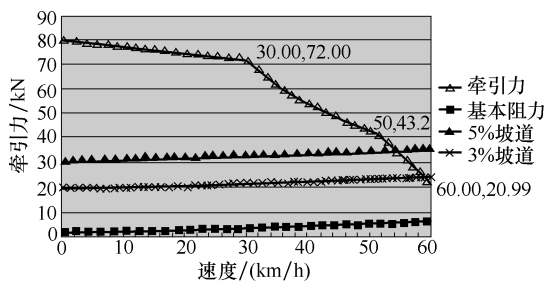


图 6-4-1 牵引特性曲线 - 210kW

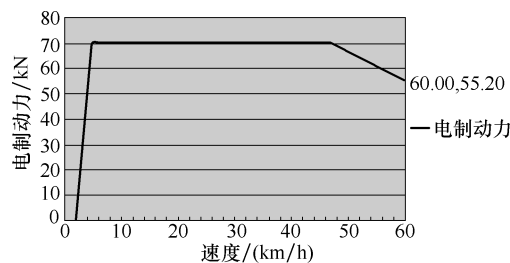


图 6-4-2 电制动特性曲线 - 210kW

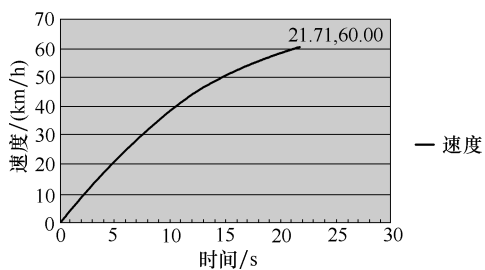


图 6-4-3 速度-时间曲线 - 210kW

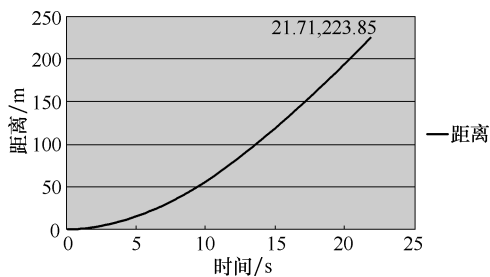


图 6-4-4 距离-时间曲线 - 210kW

2) 燃料电池按持续输出 170kW 功率计算 (夏季工况, 空调工作)。考虑到辅机工作引起的功耗损失, 具体特性曲线如图 6-4-5 ~ 图 6-4-8 所示。在平直道上, 列车可加速至 60km/h 以上, 满足指标要求, 需运行 26.4s, 运行距离 313m。在 3% 坡道上, 列车最大可加速至 53km/h。在 5% 坡道上, 列车最高可加速至 46km/h。

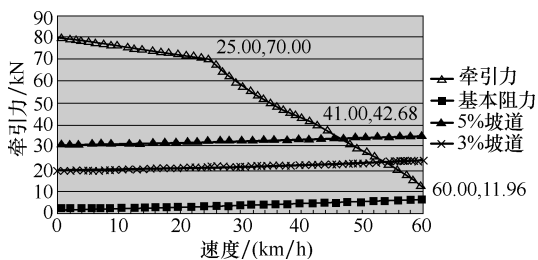


图 6-4-5 牵引特性曲线 - 170kW

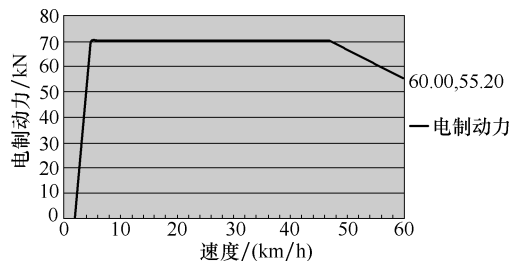


图 6-4-6 电制动特性曲线 - 170kW

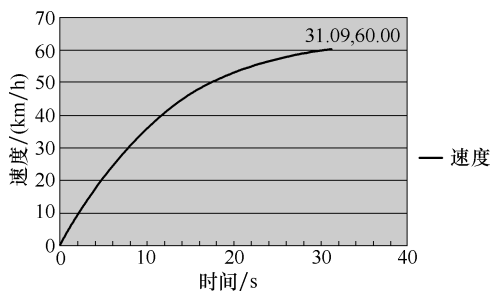


图 6-4-7 速度-时间曲线 - 170kW

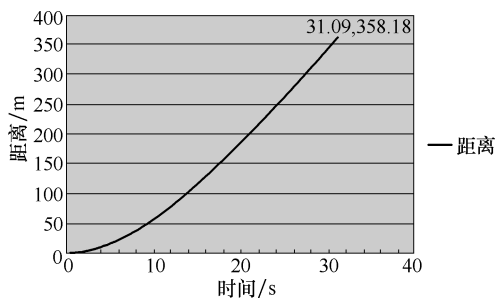


图 6-4-8 距离-时间曲线 - 170kW

此外, 紧急牵引工况下, 有轨电车靠钛酸锂动力电池可运行 3km 以上。

6.4.2 能量控制策略

混合动力牵引供电系统主要由燃料电池、超级电容、动力电池、单向 DC/DC 变换器、双向 DC/DC 变换器、能量管理控制器、牵引逆变器及牵引电机组成, 如图 6-4-9 所示。燃



料电池、超级电容与动力电池组成的复合电源，能使动力电池能量密度较大与超级电容功率密度较大的特点相结合，增强了混合电源的负载适应能力。此外，超级电容与动力电池组成的复合储能装置不仅可实现无燃料电池状态下的紧急供电，还可在有轨电车制动阶段实现能量回收，降低了不必要的能量耗损，同时还具有节约成本、改善能源结构及无污染等特点。

该系统采用单向 DC/DC 变换器对燃料电池进行控制，采用双向 DC/DC 变换器对超级电容进行控制，双向 DC/DC 跟踪检测整车的运行状态及超级电容箱、动力电池箱的容量，以调控其端电压，使三者匹配工作。

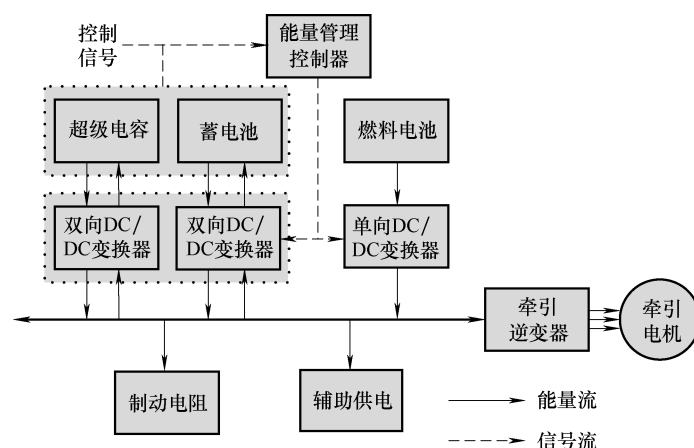


图 6-4-9 燃料电池/超级电容/动力电池供电系统基本结构

基本控制策略如下：

(1) 起动加速

如图 6-4-10 所示，当有轨电车起动时，启动燃料电池，同时利用双向 DC/DC 将超级电容融入系统。根据燃料电池响应要求，逐级提高燃料电池输出功率，需结合超级电容，利用其启动迅速、充放电快的特点，对车辆进行加速。当燃料电池达到最大输出功率后，燃料电池与超级电容同时以最大功率输出，维持有轨电车的加速运行。按照有轨电车的牵引数据，此时有轨电车工作在恒功率区，有轨电车的燃料电池 + 超级电容总功率为 773kW，恒转矩区与恒功率区转换点车速为 30km/h，加速度为 0.961m/s^2 。

当超级电容的 SOC 低于期望值 SOC_0 时，利用双向 DC/DC 变换器将动力电池组以最大输出功率融入系统。此时，燃料电池与动力电池同时以最大功率输出，超级电容继续放电，维持有轨电车的加速过程。此时，车辆从恒功率区进入自然特性区，恒功率区与自然特性区转换点车速为 45km/h，加速度为 0.601m/s^2 。

超级电容电量降低到保护电量，即超级电容 SOC 降低到保护值 $\text{SOC}_{\min}$ 时，控制双向 DC/DC 变换器将超级电容切出系统。此时，燃料电池与动力电池同时以最大功率输出，维持有轨电车加速过程，直到达到设计最高速度。

(2) 匀速行驶

当有轨电车以匀速正常行驶在轨道上时，混合动力系统由燃料电池提供能量，使牵引电机正常工作。同时，判断超级电容 SOC 是否小于期望最大值 SOC_{up} ，若 $\text{SOC} < \text{SOC}_{\text{up}}$ ，则控制双

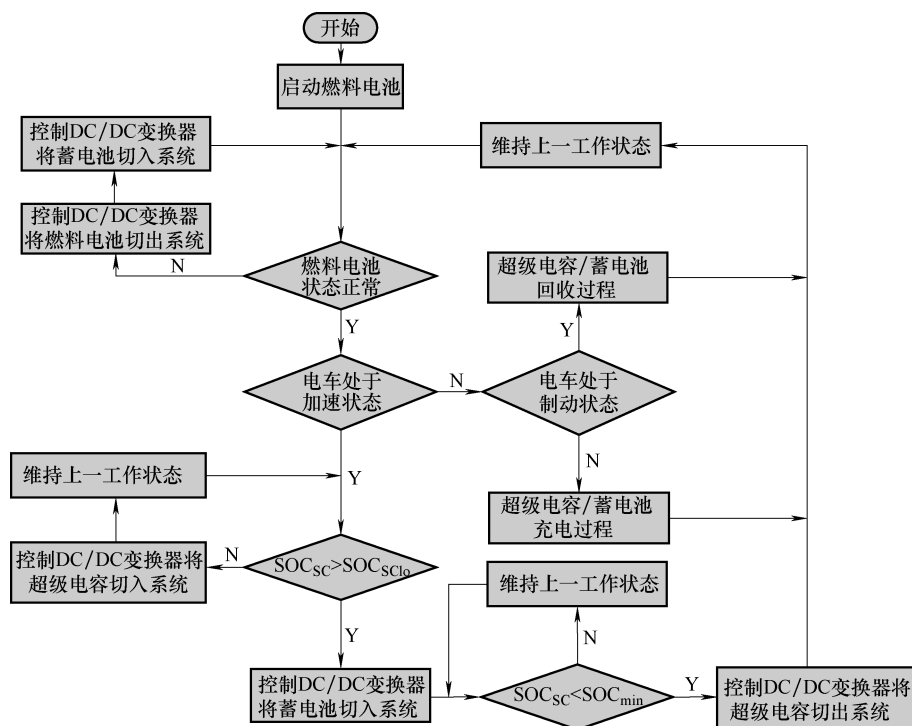


图 6-4-10 燃料电池/超级电容/动力电池混合动力系统能量管理策略流程

向 DC/DC 变换器将超级电容融入系统中，用燃料电池对超级电容进行充电，直到 $SOC \geq SOC_{up}$ ，控制双向 DC/DC 变换器将超级电容切出系统，基本充放流程如图 6-4-11 所示。

完成对超级电容的充电后，判断动力电池 SOC 是否小于期望最大值 SOC_{up} ，若 $SOC < SOC_{up}$ ，则控制双向 DC/DC 变换器将动力电池融入系统，用燃料电池对动力电池进行充电，直到 $SOC \geq SOC_{up}$ ，控制双向 DC/DC 变换器将动力电池切出系统。

(3) 车辆制动

如图 6-4-12 所示，车辆制动时，通过制动档位输入信号、超级电容 SOC、动力电池 SOC，选择是否切入超级电容、动力电池和制动电阻。

车辆制动开始，燃料电池停止向逆变器提供能量，转而只为辅助电源提供能量。

同时，判断超级电容 SOC 是否小于期望最大值 SOC_{up} ，若 $SOC < SOC_{up}$ ，控制双向 DC/DC 变换器将超级电容融入系统中，用超级电容回收车辆制动能量。若此时制动档位依然增加，则判断动力电池 SOC 是否小于期望最大值 SOC_{up} 。若 $SOC < SOC_{up}$ ，则控制双向 DC/DC 变换器将动力电池投入系统中，用动力电池回收车辆制动能量。若 $SOC \geq SOC_{up}$ ，则控制双向 DC/DC 变换器将超级电容/动力电池切出系统。

超级电容/动力电池均融入系统时，若制动档位依然增加，则控制单向 DC/DC 变换器将制动电阻逐级融入系统，消耗制动能量。若超级电容/动力电池切出系统后，车辆仍未完全停下，则启动机械制动系统辅助制动。

(4) 应急牵引

若燃料电池发生故障无法为混合动力系统提供能量，则利用断路器将燃料电池切出系

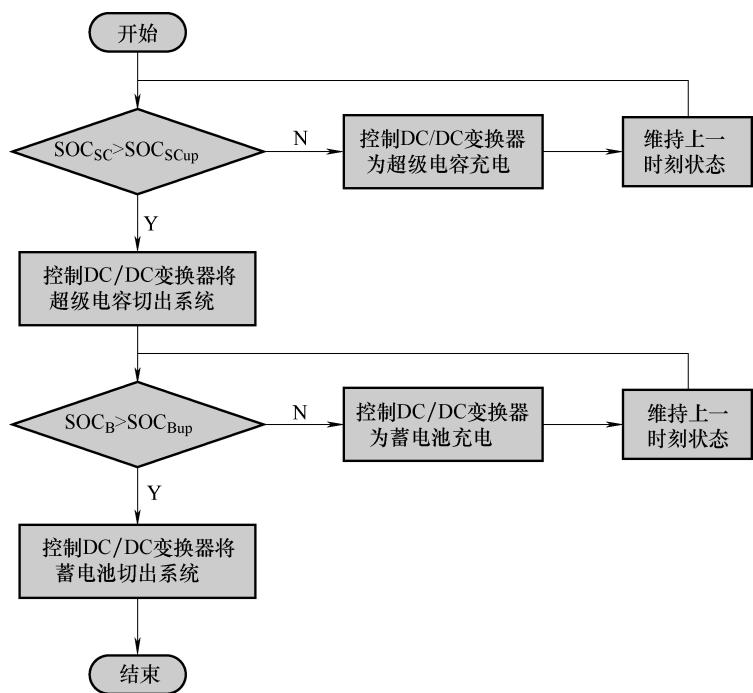


图 6-4-11 超级电容/动力电池充电流程

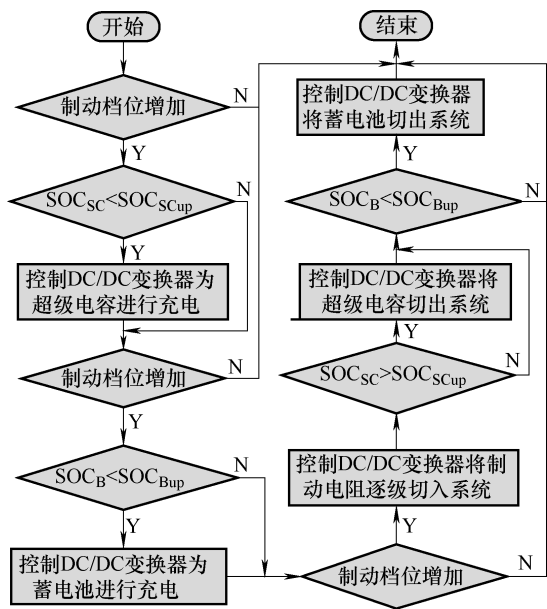


图 6-4-12 超级电容/动力电池回收流程



统,同时控制双向 DC/DC 变换器将动力电池融入系统。此时,由动力电池单独为混合动力系统提供能量。

6.5 混合动力系统集成设计技术

设计人员基于车体结构轻量化设计、热控制及热量利用、振动模态匹配、噪声控制等设计技术,进行燃料电池混合动力系统与车辆系统的接口匹配设计,同时兼顾了系统安装/检修方便性、整车系统安全性、系统布局美观性,完成车体结构和车顶大部件安装方案设计,并对通过限界、曲线通过能力、强度、模态、动力学性能、隔热性能等技术指标进行了全面分析验证。

燃料电池系统将燃料电池模块、PLC 控制器、氢气循环控制器、空气压缩机、冷凝散热器等集成在一个箱体内部,实现体积优化和减重设计。

6.5.1 气路接口

图 6-5-1 为燃料电池模块模型图,其各接口与燃料电池箱体接口相连。空气入口位于燃料电池模块面板右上角,与空压机系统相连。

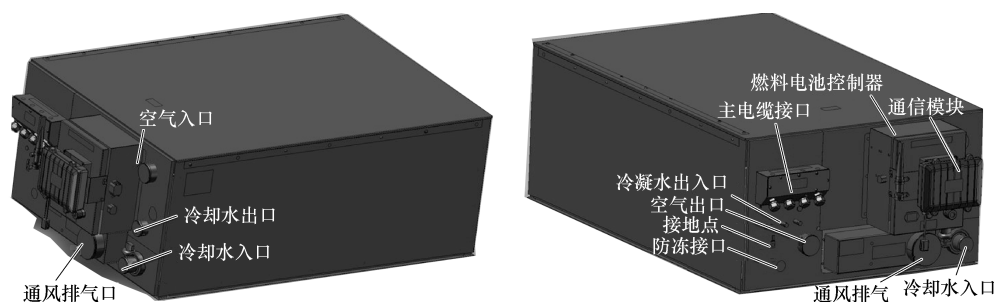


图 6-5-1 燃料电池系统空气接口

图 6-5-2 所示为燃料电池气路系统,它由空气过滤器、进气管道、空气流量计、空压机、旁路阀、空压机排气管道、排气管道、排气消声器、通风排气管道等构成。空气流量计上下游需有 300mm 直管,因此距离空压机和空气过滤器较远。空压机泵体需用油冷却和润滑,需要一套油冷却系统,经过换热器将润滑油携带的热量传给冷却液。空压机电机和空压机控制器均需水冷却。空气系统中部分管道为硬管,连接管道为硅橡胶材质。

图 6-5-2 中还显示了氢气路配置。氢气安全回路设计在储氢模块内部,因此燃料电池箱体内部氢气回路相对简单,包括 1 个氢气入口接头、1 个手动球阀、1 个电磁阀、1 个压力传感器及相应管路。

图 6-5-3 所示为空气过滤器的结构,利用燃料电池箱体一角,采用钣金工艺围成空气过滤器腔体。空气通过燃料电池箱体壁面上的空气进口进入,从进气口流经空气滤芯,滤除空气中的颗粒物与杂质,进入进气管道。滤芯需要定期更换,滤芯上部有一滤芯盖,采用螺栓紧固。更换滤芯时,可松开螺栓,移除滤芯盖,以便取出滤芯。

燃料电池系统所用压缩机为离心式压缩机,采用水冷永磁同步电动机驱动。压缩机电动机控制器直接从燃料电池输出端取电 (DC 440 ~ 710V),驱动泵体进行空气压缩。离心式压缩机

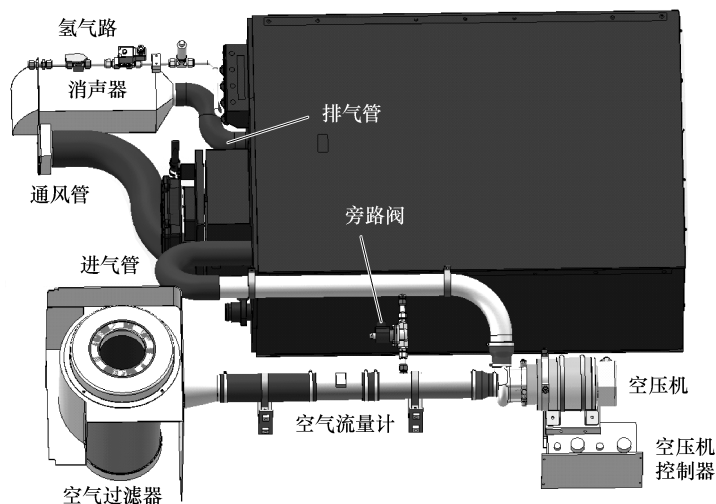


图 6-5-2 燃料电池气路系统

在低速转动时会发生喘振，因此在进、排气管之间增加了旁路系统。燃料电池需求的空气流量低于某一数值时，防喘振阀打开，使部分空气回流到进气管道中，避免压缩机发生喘振。

压缩机泵体需采用润滑油保证润滑和密封，因此空压机配有一套油路系统，如图 6-5-4 所示，包括油罐、油滤和换热器。空压机泵体转动时，润滑油在油路中流动，在换热器中将热量交换给冷却液。

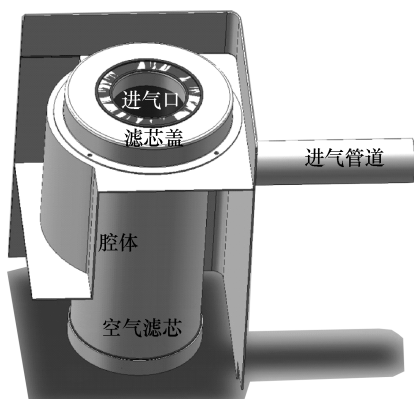


图 6-5-3 空气过滤器

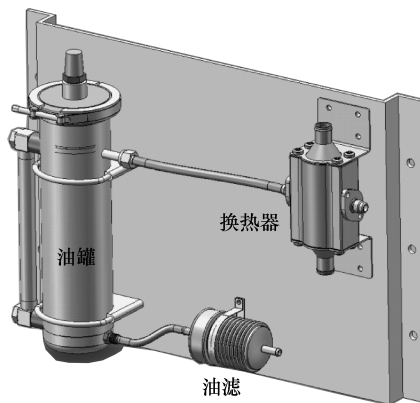


图 6-5-4 空压机油路系统

6.5.2 冷却接口

燃料电池冷却系统包括燃料电池冷凝液、氢气循环泵、空压机电动机、空压机控制器、油路热交换器等。图 6-5-5 所示为燃料电池冷却液循环系统。

燃料电池冷凝液、氢气循环泵、空压机电动机、空压机控制器、油路热交换器等都是冷却系统的支路，在图 6-5-5 中没有全部画出。冷却液入口与散热器冷却液出口相连，冷却液经过散热器降温后，流经节温器和流量计，主液路进入燃料电池模块，分出一条支路进入冷



凝散热器，将液温进一步降低。流出燃料电池模块的冷却液经冷却液泵增压后流出冷却液出口，到达散热器模块的冷却液入口。流经凝散热器的冷却液分几路分别进入燃料电池模块、氢气循环控制器、空压机油路热交换器、空压机电动机、空压机控制器等，最后这些支路全部汇集到冷却液泵入口管道处。还有一条管路连接燃料电池冷却液出口和入口，中间流经一个离子交换柱，去除其中的杂质离子。节温器连接了冷却液的出入液管道，其作用是在冷却液温度低于额定温度时，使冷却液从内部小循环回路流过，不经过外部散热器大循环，这样可使液温更快上升到额定值，确保燃料电池发电效率。同时也可避免冬天温度过低时，0℃以下的冷却液进入燃料电池模块，使燃料电池受损。

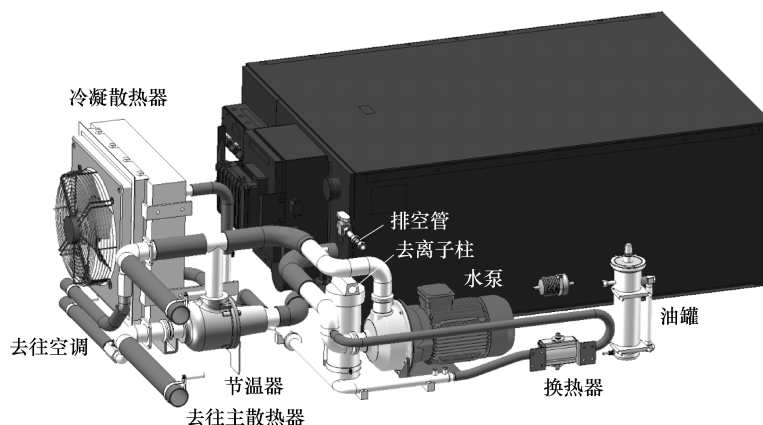


图 6-5-5 燃料电池冷却液循环系统

燃料电池系统冷却液入口温度应控制在表 6-5-1 所示的范围内。如果冷却液回液温度超出范围，则控制系统会自动降低燃料电池输出功率或让系统停机。如果冷却液回液温度低于额定回液温度，则会导致燃料电池系统效率降低。燃料电池系统控制器会自动控制散热器风机工作频率，以控制冷却液回液温度，用户需确保散热器有足够的散热能力，以确保在恶劣工况下将回液温度控制在额定范围内。

表 6-5-1 燃料电池冷却液入口温度要求

参 数	数 值
额定冷却水回水温度/℃	50 ~ 63
最高冷却液回液温度/℃	≤66
最低冷却液回液温度（无冷起动）/℃	>5
最低冷却液回液温度（冷起动时）/℃	> -30

6.5.3 电气/机械接口

1. 燃料电池系统

燃料电池系统中的电气系统主要包括布置在负极舱中的氢气循环控制器、24V 直流电源、水泵及风机变频控制器、PLC 控制器、空压机控制器及布置在燃料电池舱中的电路保护器件等，如图 6-5-6 所示。几个大部件安装在箱体中间隔板上，空压机变频器安装在箱体壁



面上。电路保护器件安装在燃料电池舱排气消声器上方。

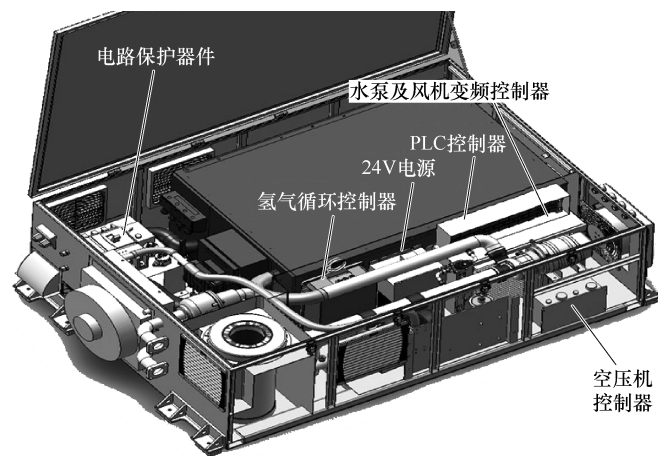


图 6-5-6 燃料电池电气系统

图 6-5-7 ~ 图 6-5-9 为布置在负极舱中的氢气循环控制器、24V 直流电源、水泵和风机变频控制器、PLC 控制器、空压机控制器及布置在燃料电池舱中的电路保护器件等电气元件结构图。

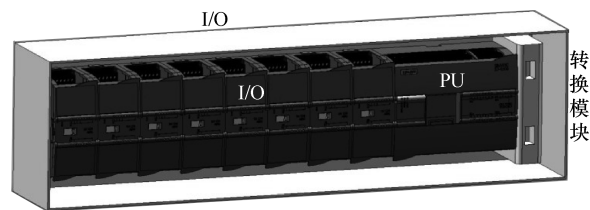


图 6-5-7 PLC 控制器

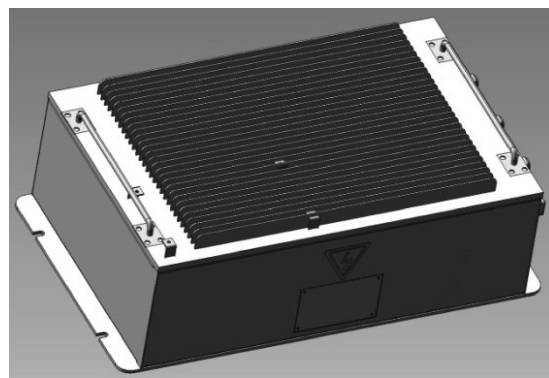


图 6-5-8 水泵及风机变频控制器

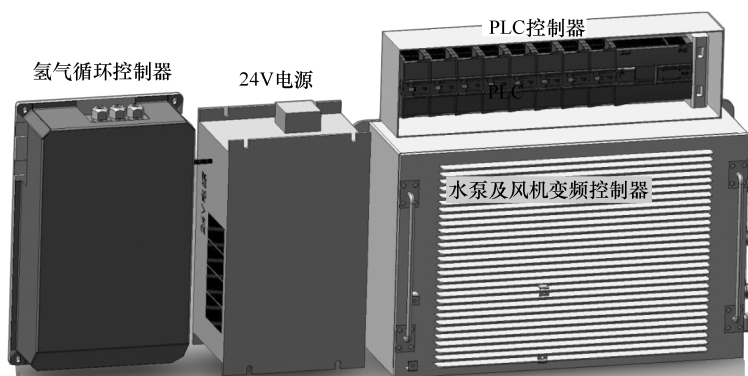


图 6-5-9 几个电气部件的相对位置布局

2. 超级电容/动力电池储能系统

(1) 超级电容/动力电池配置方案

每套系统包含 1 个双向 DC/DC 电源电池箱（内有 1 套动力电池、1 个双向 DC/DC 动力电池模块、1 个双向 DC/DC 超级电容模块、外围电器及系统控制单元）和 1 个超级电容箱。每套超级电容/动力电池储能系统的模型及参数如图 6-5-10 所示。

(2) 动力电池引空调风冷却方案

动力电池电芯布置密集，工作时会产生 1~3kW 的热量，需进行有效冷却，以确保每个电芯的温度分布满足设计要求。动力电池的工作温度超过 55℃ 时，对其寿命的影响将迅速加剧，因此要求动力电池箱内工作温度不超过 55℃，且温度均匀性为 5℃。

单一的冷却方式（强迫风冷）已不能保证动力电池箱在良好的状态下工作，需要采用综合冷却方案（强迫风冷 + 引空调风冷却），使动力电池箱在理想温度范围内工作。从客室引废排风，温度为 28℃，最大风量 1200m³/h，从箱体底部进口进风，进风口尺寸 180mm × 250mm。采取空调的安装方式，利用客室内的废气对动力电池箱进行冷却，最终排出车外，图 6-5-11 和图 6-5-12 所示为双向 DC/DC 电源电池箱和车顶开孔方案。

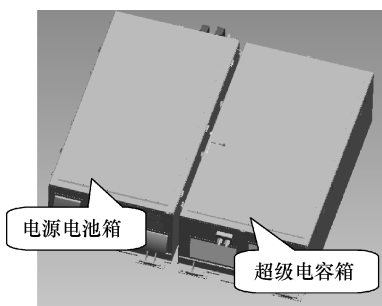


图 6-5-10 混合动力箱

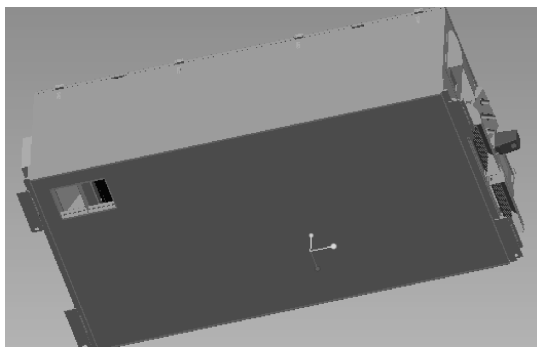


图 6-5-11 动力电池箱

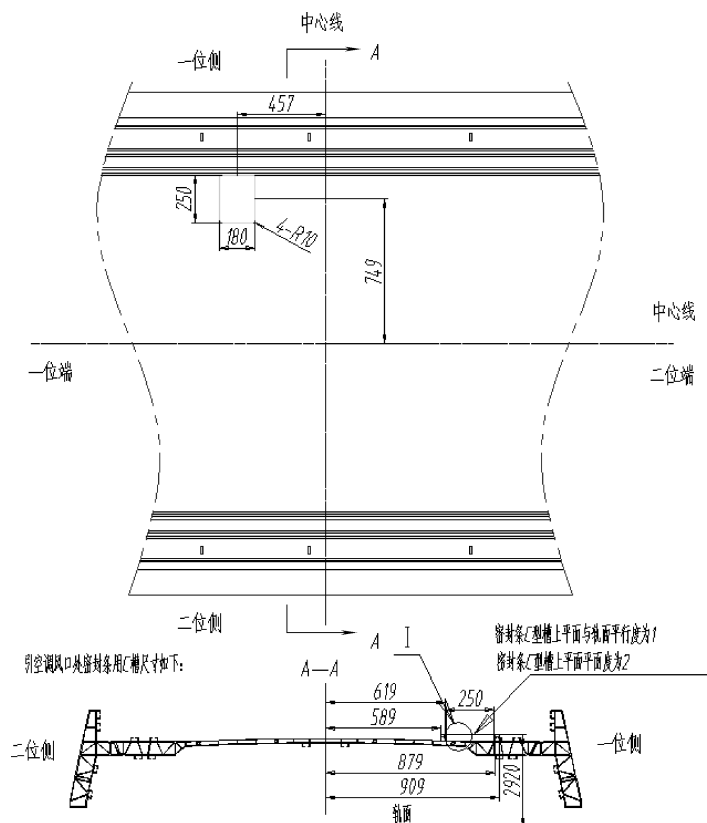


图 6-5-12 车顶开孔方案

3. 储氢/供氢系统

(1) 加注子系统

加注子系统包括加注接口、单向阀、过滤阀、压力表及必要的连接管路等零部件，用于与加氢站的加注对接，将高压氢气安全地注入车载高压氢气瓶中，如图 6-5-13 所示。

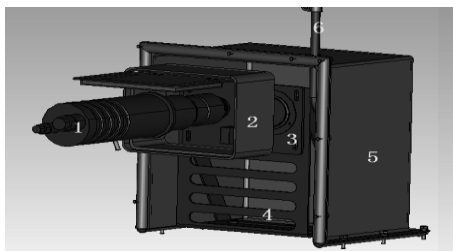


图 6-5-13 加注子系统

- 1—加注枪，通过加注枪实现氢气站与车载储存子系统间的连接并进行加氢
- 2—车体开孔焊接套，与车体两侧焊接并带有舱门，保护加氢口
- 3—加注面板，含有加注口、压力表
- 4—加注面板底座，通过滑条与车体连接
- 5—加注舱后盖，加装密封条，通过螺栓与客室内部车体连接，既保证氢气向客室扩散也方便检修
- 6—输氢管，该管路采用一整根不锈钢管直接到达车顶，保证氢气不向客室泄漏



加氢口在车体下部，需要在车体上开孔以便安装。考虑到车体强度的要求，将开孔的面积缩到最小并进行圆角处理。设置舱门以保护加氢口，舱体只有舱门处与外界大气相通，保证氢气不会进入到车厢内部。在加注模块上装有导除静电装置，进行加注时需要把加氢站上的静电导线与车辆上的导除静电装置连接，把车辆上的静电通过加氢站消除后再进行加注。从加注口到车顶的氢气管路采用完整不锈钢管连接，保证管路经过车厢时不会因接口而产生泄漏危险。

(2) 储存子系统

储存子系统包括高压氢气瓶、组合瓶阀、压力释放装置（简称 PRD，属于安全保护装置，一旦动作不可恢复）及连接管路，用于将高压氢气储存在高压氢气瓶中，如图 6-5-14 所示。

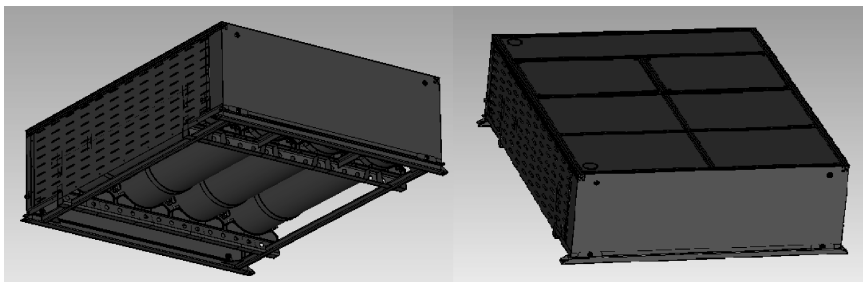


图 6-5-14 储存子系统

储存子系统上设有 2 个静电连接点，以方便将储存模块产生（携带）的静电通过导线引导到静电连接点上，然后通过整车将静电释放。储存子系统外部安装有遮阳罩，遮阳罩可避免阳光直射到氢气瓶上。遮阳罩上设有通风孔，氢气泄漏时，可通过通风孔及时扩散到外界环境中，避免氢气聚集。为方便系统检修，遮阳罩上还设有检修门。

储存系统安装在车顶，采用螺栓及减振垫安装，气路接口处采用高压软管进行连接，保证不会因振动导致接口松动。

(3) 供给子系统

供给子系统包括电磁阀、减压器、安全阀、过滤器、放空阀、放散口、连接管件及固定支架等，用于向燃料电池系统等提供合适压力的氢气。供给子系统内所有零件均安装在固定支架上，组成供给系统，并安装在储存系统中。供给子系统如图 6-5-15 所示。

电磁阀为防爆型，工作压力为 45MPa，工作电压为 DC24V。

减压阀用于将气瓶内释放出的高压氢气减为中压或低压，进而供给燃料电池。减压阀的出口压力可根据燃料电池需求进行调节，将最大入口压力设为 41.3MPa，出口压力设为 1.6MPa。

安全阀位于减压阀之后，其作用压力设为减压阀出口压力的 1.3 倍。一旦减压阀下游的压力上升，超过安全阀的开启压力，需进一步降压，安全阀便开启，将气体从管路中排出，达到保护下游零部件的目的。

过滤阀、放空阀、放散口为氢气管路提



图 6-5-15 供给子系统



供气体过滤、过压保护等功能，保证储氢/供氢系统的安全。

(4) 预警子系统

预警子系统包括氢泄漏探头及控制、报警装置，也可将预警信号输送给整车控制器，由整车控制器发出预警命令。用于监控氢的泄漏状况，当监测点浓度达到预设的报警值时发出预警信号。

预警子系统包括 5 个氢气泄漏检测探头和控制器，分别布置在加注子系统、车内电器柜、燃料电池系统、储存子系统中。泄漏监测探头把检测到的气体浓度发送给控制器，由控制器根据控制逻辑发出相应指令。氢气泄漏检测浓度可分为 3 个报警级别，根据不同级别设定不同的控制指令。最高级别的报警值设置不应超过氢气爆炸下限的 50%。

6.5.4 冷启动系统

燃料电池模块内部装有冷启动系统，它与燃料电池防冻系统共同作用，保证 0℃ 以下的冷却液不会进入燃料电池电堆引起电堆冰冻损坏，如图 6-5-16 所示。冷启动系统和燃料电池系统冷却液泵协同作用，从燃料电池模块的外部逐渐混合冷却液，从而保证低温冷却液不会进入燃料电池电堆内部。

当然，如果环境温度始终不会低于 0℃，则模块中不用安装这种冷启动系统和防冻系统。

如图 6-5-16 所示，HD6 模块内部的冷启动系统由 1 个冷却液泵和 1 个单向阀组成。防冻系统保持 HD6 内部温暖。模块启动后，内部的冷却液泵使温热的冷却液在燃料电池电堆中循环。冷却液流速要通过 CAN 总线发送给驱动系统，HD6 模块按要求的流速将冷却液从主泵引入主循环管路。主冷却液泵根据指令流速调整转速，以满足适时冷却液流量需求。

HD6 控制器监控进入燃料电池模块的冷却液温度。冷启动泵工作时，进入 HD6 模块的低温冷却液与燃料电池内部循环的冷却液混合，一直持续到进入模块的冷却液温度大大高于冰点，表明整个冷却循环已经预热完成。此时，HD6 控制器关闭冷启动泵，只有主冷却液泵在向 HD6 模块提供冷却液。

模块内的单向阀起到防止冷却液从燃料电池电堆冷启动回路流过的作用。在燃料电池模块的冷却液入口处装有 1 个单向阀，如图 6-5-17 所示，可确保只有冷启动泵在运行时冷却液不会倒流。

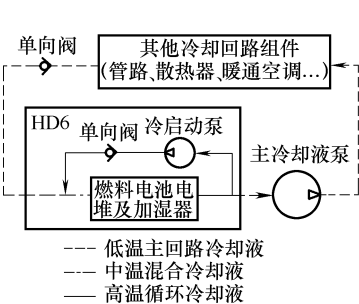


图 6-5-16 冷启动系统示意图

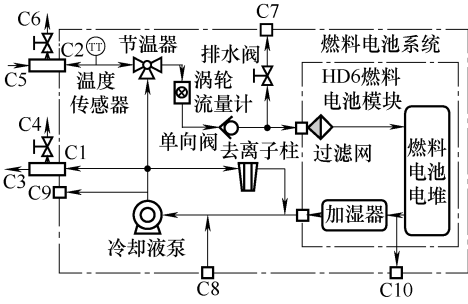


图 6-5-17 燃料电池冷却液循环系统结构



6.5.5 防冻保护

燃料电池系统中安装的 HD6 燃料电池模块中, 含有内部防冻保护系统。HD6 模块未运行时, 环境温度可能降至冰点以下, 此时需要启动此防冻系统。防冻保护是通过内置在模块周围的电阻式加热器实现的。此加热器加热 HD6 模块内部, 通过温度开关的控制, 使模块内部所有重要部件的温度都保持在冰点以上。该防冻保护加热器与冷启动系统协同作用, 保证 HD6 模块和燃料电池电堆不会因低温受损。

用户需确保防冻保护系统供电插座安装有漏电保护开关。用户需确保防冻保护系统的电源已接通, 且报警点不显示报警状态。防冻保护系统正常运行前应进行测试, 确保防冻系统正常工作。

防冻保护系统供电为 AC 220V, 功耗 900W。燃料电池模块已经过 -30°C 以上环境下的防冻保护验证。对低于 -30°C 的极寒环境, 防冻保护功率可能并不能满足防冻要求, 燃料电池仍有可能面临冰冻危险。用户需要确保燃料电池系统在实际应用环境中的最低温度下, 仍可正常启动和工作, 避免冰冻危害。

6.5.6 氢气泄漏检测

氢气浓度传感器将电压信号输入 PLC 控制器, 其外形如图 6-5-18 所示。

氢气是无色、无味、无毒的高可燃性气体。如果集聚氢气取代空间中的氧气, 则会导致窒息。此外, 失去知觉前没有任何警告性症状。氢分子比其他气体分子都要小, 这使氢气很难存放。它可从许多看似密封的材料中扩散出去。此外, 氢气的小分子性导致其具有高浮力和扩散率, 因此泄漏的氢气会扩散并迅速稀释。

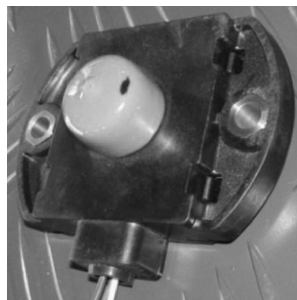


图 6-5-18 氢气浓度传感器

HD6 内部发生的氢气泄漏可由内部氢气检测装置检测出, 这会在氢气/空气混合物达到可燃浓度前触发警告。外部的泄漏检测装置安装在燃料箱箱盖上方。如果怀疑存在过度氢气泄漏情况, 则应终止燃料电池电堆的运行, 并进行泄漏测试。

作为预防性维护的一部分, HD6 模块板上的氢气传感器必须根据维护计划进行检查。

氢气传感器暴露在污染环境中可能会发生性能衰减, 衰减后灵敏度变差。定期检查以确保这些传感器有足够的灵敏度。不执行定期的氢气传感器检查, 可能会造成不安全的 HD6 操作。如果传感器失效, 导致模块在可燃尾气或通风管道泄放时, 则可能不能紧急停机。

6.6 能量综合利用技术

6.6.1 动力电池箱引空调风冷却

1. 动力电池箱综合冷却可行性分析

(1) 风冷可行性分析

在所有方案中, 通风冷却是最经济、使用最广泛的冷却方式, 与其他方式相比, 风冷装



置结构简单、安全、维护方便。风冷的缺点主要表现在受外部环境影响较大，冷风状态不确定，环境湿度、颗粒物含量、空气温度等参数不稳定。空调排风温度相对稳定，不含或仅含少量颗粒物，风量来源稳定。

在保证箱体内部绝对温度符合要求的前提下，产生温度不均匀现象的主要原因是流经各箱体内部的冷风流量不均。通过调整动力电池箱排布或加装挡板等方式，优化流量分布可减少内部温度不均匀情况。

在保证风量、进口温度前提下，风冷能满足冷却量的要求。

合理设计风道并保持风压的前提下，风冷可保证温度均匀性要求。

在风冷设计中，通过合理的气流组织可实现动力电池箱内部温度均匀。通常并联结构的进风方式有良好的温度均匀性。串并联进风方式如图 6-6-1 所示。

动力电池箱的进风方式属于并联，但其进风的流阻分布不均。在不加入改进措施的情况下，出现温度差异的区域或为冷风进口区或冷风出口区，具体温度分布需具体分析。由于空调风量达到 $600\text{m}^3/\text{h}$ ，为减少进口风的能量损失，达到引导气流的效果，空调进风口应尽可能地大，同时加设导流板。图 6-6-2 所示为导流板架设示意图。

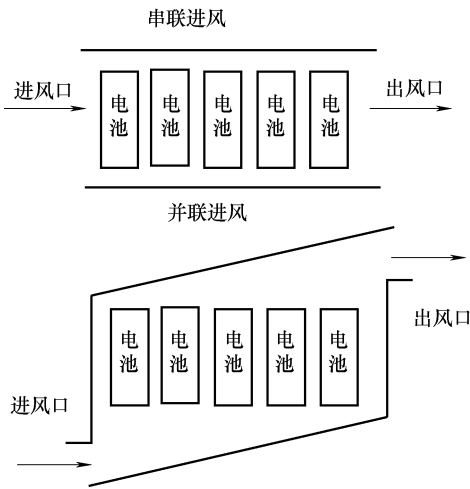


图 6-6-1 串并联进风方式

(2) 相变冷却可行性分析

相变材料冷却适用于高功率密度场合，对稳定动力电池箱箱体温度有很大优势。另外，相变材料导热系数普遍较低，相变停止时，会产生保温效应，不利于散热。

相变冷却主要针对箱体内部局部环境的影响，仍需辅以风冷方式。当动力电池箱内部温度过高时，相变材料会降低箱体内部温度。当整体温度符合要求，内部温差过大时，相变材料只对局部环境造成正面影响，从而保证温度均匀性。

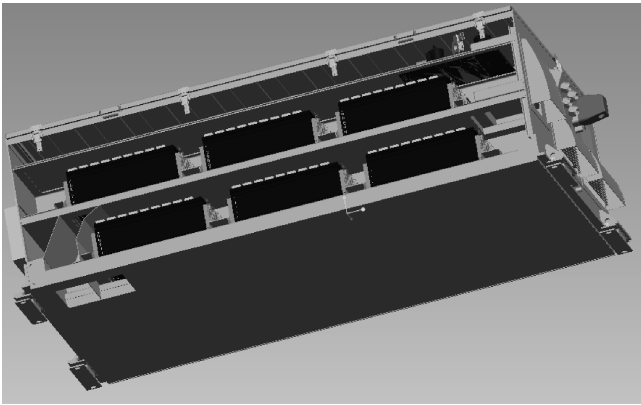


图 6-6-2 导流板架设示意图

按照本章采用的动力电池箱结构，即使采用相变材料，风冷仍是动力电池箱的主要冷却方式，相变冷却作为一种辅助手段，只能对箱体内部局部环境温度产生影响。当动力电池箱内部温度过高时，相变材料融化吸热，可降低箱体内部温度。当整体温度符合要求，内部温差过大时，相变材料可对局部环境温度起到调节作用，从而保证温度均匀性。

动力电池发热主要集中在充放电阶段，其发热阶段呈间歇性，发热功率最大为 2352W 。



针对相变材料导热系数较低的问题，目前多采用导热性良好的泡沫金属材料提高整体传热效果，可有效稳定动力电池箱内部温度。相变冷却需解决如下问题：

- 1) 明确动力电池发热周期及发热率等工作特性。
- 2) 在电芯表面加入导热铝（铜片），导出动力电池内部热量。
- 3) 确定风冷方式可带走的热量和相变材料实际承担的散热负荷。
- 4) 由于集热块截面积较小，在相变材料与集热块之间需采取措施增大连接面积。
- 5) 分析动力电池箱状态，形成以高效利用空间为原则的相变材料布置方案。采用理论与数值分析方式，确定相变冷却和风冷方式散热量，最终确定风机的风量和风压。

2. 引空调风冷却方案

针对动力电池箱结构进行引空调风冷却方案分析，如图 6-6-3 和图 6-6-4 所示。流动仿真分析中，除分析不同进口流速下箱体内部流速及压力的分布情况外，还要考虑动力电池箱结构对内部流场的影响。

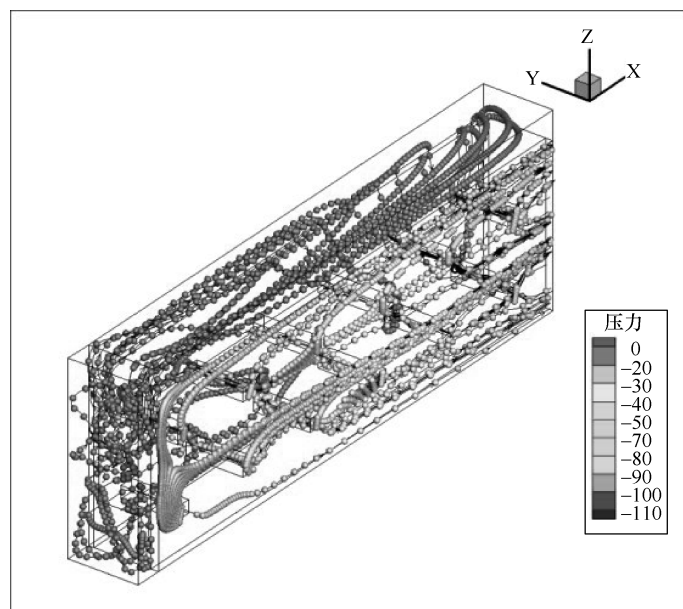


图 6-6-3 $V=2\text{m/s}$ 工况下，无加强筋流动仿真结果云图

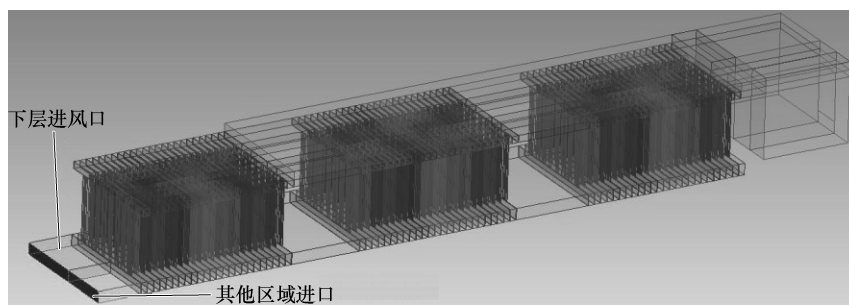


图 6-6-4 下层空调风模型及其他区域模型



最终确定采用动力电池箱底部引空调风冷却的结构方案，如图 6-6-5 和图 6-6-6 所示。

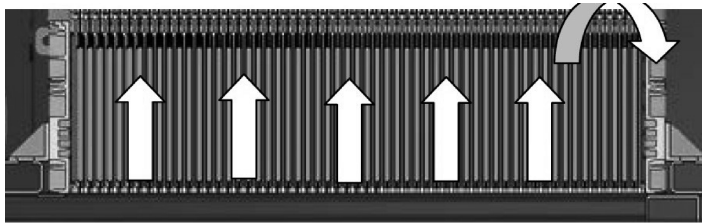


图 6-6-5 动力电池模块进风方式

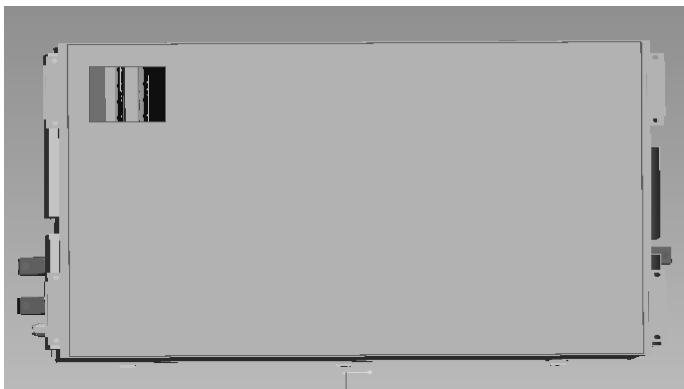


图 6-6-6 动力电池箱与车体接口

采取空调的安装方式，动力电池箱底部作为进风口，车顶距离侧墙 400mm 的位置与动力电池箱底部连接，利用客室内的废气对动力电池箱进行冷却，最终排出车外。

3. 相变装置冷却方案

动力电池发热主要集中在充放电阶段，且其发热呈间歇性。不同于风冷，相变冷却主要用于冷却箱体内部局部环境。当动力电池箱内部温度过高时，相变材料融化吸收热量，从而降低箱体内部温度。当整体温度符合要求，内部温差过大时，相变材料通过融化吸热（或冷凝放热）调节局部环境温度，从而保证温度均匀性。

针对相变材料导热系数较低的问题，目前多采用嵌入泡沫金属材料的方式解决。泡沫金属有良好的导热性，但其重量与相同体积金属相比大大减小。目前常用的泡沫金属有泡沫铜、泡沫铝，在动力电池箱中采用泡沫金属与相变材料相结合方式，可有效稳定动力电池箱内部温度。

出于成本、绝缘及安装等方面考虑，相变材料无法与热源（动力电池电芯）直接接触，这给相变材料使用带来困难。解决方式主要是建立热量流通通道，将热量引出动力电池模块，然后通过相变材料吸收模块释放的热量。

相变冷却系统由 3 部分组成：导热片、集热块和相变模块。如图 6-6-7 所示，相变材料布置在动力电池电堆表面，通过制作合适大小的相变模块，避免绝缘问题，提高安全性。

方案中，每 6 片电芯组成一组，构成小型相变单元，共 16 组。各组之间不连通，集热



块与电堆表面留有气体流动通道。每组相变单元之间的区域涂有绝缘漆。为增加空气对流效果，在动力电池组侧边区域可架设小风机，用于弥补相变材料布置导致的风冷装置冷却性能下降。

(1) 导热片

导热片尺寸如图 6-6-8 所示。导热片通过电极通道插入电堆中，并通过铆钉与集热块连接。集热块表面加工平整，为减少接触热阻，导热片与集热块中间涂有导热胶。

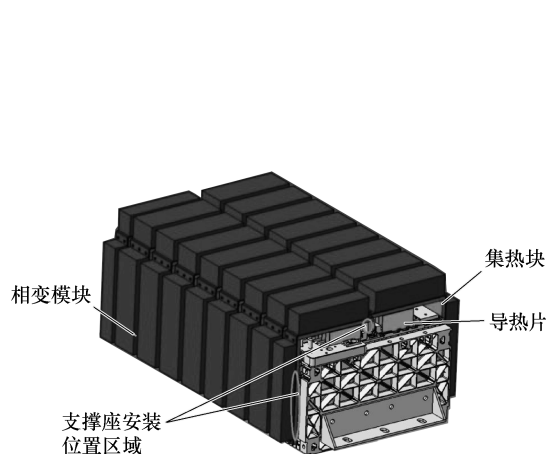


图 6-6-7 相变方案组装示意图

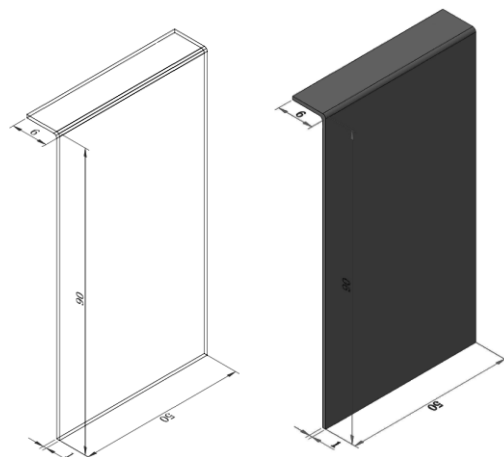


图 6-6-8 导热片结构

(2) 集热块

集热块布置形式如图 6-6-9 所示。集热块与导热片及相变模块通过螺栓连接。

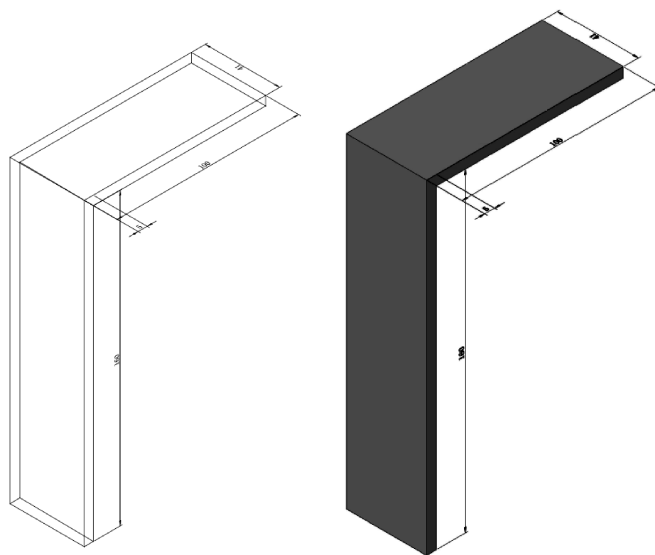


图 6-6-9 集热块布置形式



(3) 相变模块及计算

在动力电池组顶部可布置 16 组相变块，每组相变模块由 2 个矩形相变块组成。以石蜡作为相变材料。矩形相变模块的尺寸如图 6-6-10 和图 6-6-11 所示。

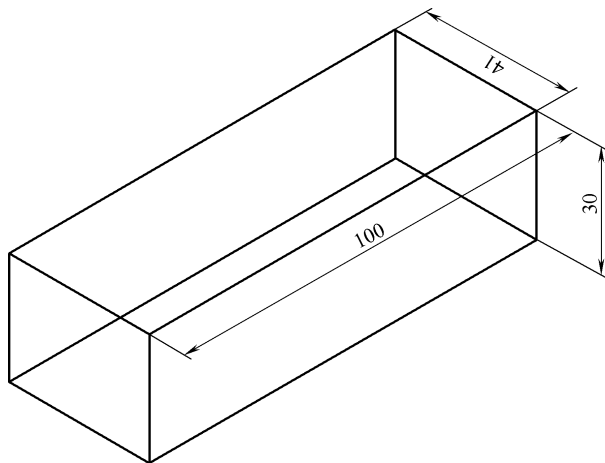


图 6-6-10 相变模块一的结构尺寸

将上述零部件组装成相变冷却系统，系统安装图如图 6-6-12 所示。

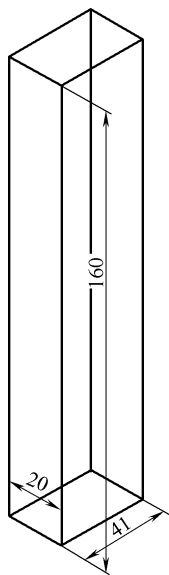


图 6-6-11 相变模块二的结构尺寸

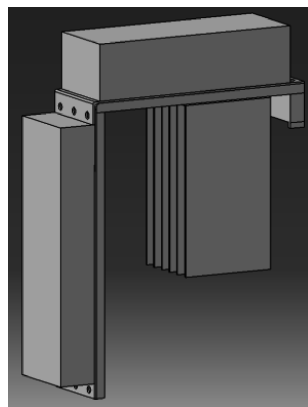


图 6-6-12 相变系统安装

多种对比方案的计算结果见表 6-6-1。



表 6-6-1 综合冷却方案计算结果对比

工 况	对 比 项 目	值
风量	最小 200m ³ /h	
	最大 300m ³ /h	
无相变, 28℃ 工况箱体最大温差对比	流量 200m ³ /h	温差 8.7℃
	流量 300m ³ /h	温差 3.5℃
无相变, 42℃ 工况箱体最大温差对比	流量 200m ³ /h	温差 8.5℃
	流量 300m ³ /h	温差 3.9℃
无相变, 箱体最大压差对比	流量 200m ³ /h	通风阻力 385Pa
	流量 300m ³ /h	通风阻力 850Pa
局部布置相变, 42℃, 200m ³ /h 箱体温差	最高 50.8℃	温差 3.2℃
	最低 47.6℃	
局部布置相变, 28℃, 200m ³ /h 箱体温差	最高 37.3℃	温差 4.6℃
	最低 32.7℃	
未布置相变, 42℃, 200m ³ /h 箱体温差	最高 55℃	温差 8.5℃
	最低 46.5℃	
未布置相变, 28℃, 200m ³ /h 箱体温差	最高 41.5℃	温差 8.7℃
	最低 32.8℃	
布置相变后, 箱体内部流速对比	局部布置相变材料	风速: 最大 8.4m/s, 最小 3.5m/s
	全部布置相变材料	风速: 最大 18m/s, 最小 2.5m/s
布置相变后, 箱体内部压力对比	局部布置相变材料	通风阻力 485Pa
	全部布置相变材料	通风阻力 702.2Pa
局部布置相变, 42℃, 200m ³ /h 箱体相变吸热量	3.5m/s	1.3W
	8.4m/s	0.8W

根据对比结果, 箱体内部最小空气流量为 200m³/h, 大流量对风机压力要求更大。只采用局部布置相变材料的情况相对于没有布置相变材料的情况, 箱体内部温度及其温差下降明显。经过以上对比分析, 确定主要参数见表 6-6-2。

表 6-6-2 最佳冷却方案主要参数

名 称	值
冷却方式	风冷 + 相变冷却
冷风温度	小于 42℃
需要的最小压力	450Pa
箱体内部最大风速	8.4m/s
箱体内部最小风速	3.5m/s
内部电堆流量分布比例	1: 1.224: 1.715
相变模块	泡沫铜 + 石蜡
相变布置形式	局部 4 个电堆布置相变材料



(续)

名 称	值
相变模块工作时间	4h
相变材料工作温度	40℃
箱体内部最大温度	50.8℃
箱体内部最大温差	4.6℃
相变冷却装置总重量	小于 70kg
安装空间	各层上部空间 50mm 即可

计算及试验结果表明，28℃及42℃情况下，局部布置相变材料，均可使动力电池箱温度低于55℃，内部各点温差小于5℃。

6.6.2 余热利用

余热采暖系统利用燃料电池电堆散发的废热，为客室供暖。余热传递介质为体积分数44%乙二醇/体积分数56%水溶液（以下简称溶液），溶液温度约70℃，流量最大可达330L/min。通过余热利用溶液连接管路将热量传递介质由燃料电池电堆引入/流出空调机组内部余热利用换热器。在空调机组通风机作用下，新风和回风的混合空气流过余热利用换热器，温度升高，达到对客室供暖的目的。

(1) 空调机组内增加余热换热器

在空调机组内部蒸发器与通风机之间设置余热利用换热器，如图6-6-13所示。在采暖季，

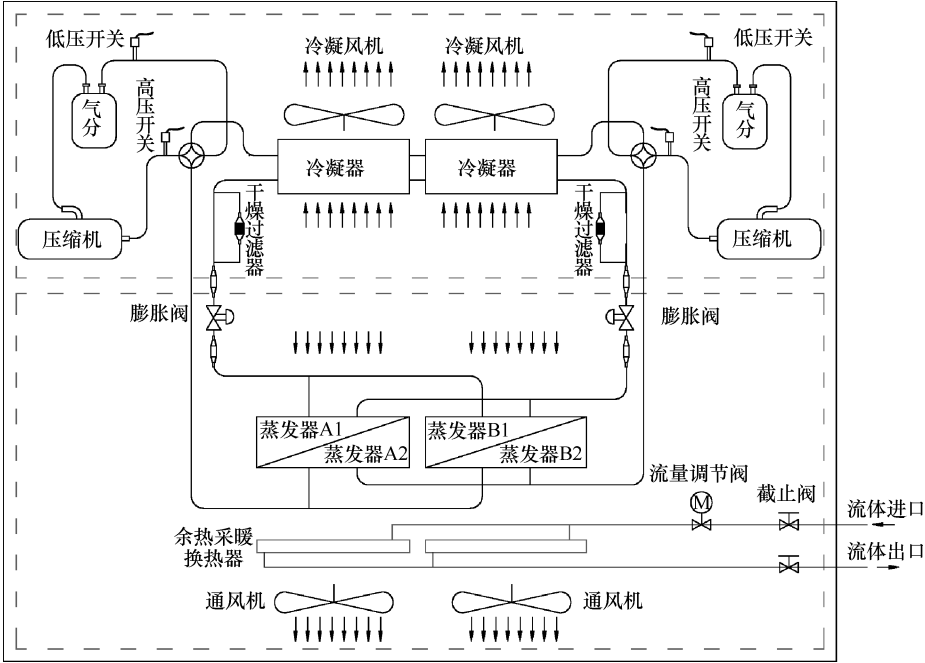


图 6-6-13 空调机组原理图



携带电堆热量的流体流经余热采暖散热器。在通风机作用下，混合空气与余热换热器进行热交换。流体进口设置电动流量调节阀，根据散热器表面温度或出风温度可自动调节阀门开度，以增大/减小进入余热换热器的热量。在溶液进口设置手动截止阀，在非采暖季或管路维修期间，可手动将阀门关闭。仅当余热不足以为客室供暖时，机组热泵才为客室补充热量。

(2) 管路布置

空调机组布置在 Mc 车顶，管路需从相邻 Tp 车燃料电池箱经过贯通道上方，跨接到机组端部。贯通道上方管路采用三元乙丙橡胶软管，其余部分管路采用不锈钢材质。详细布置如图 6-6-14 所示。

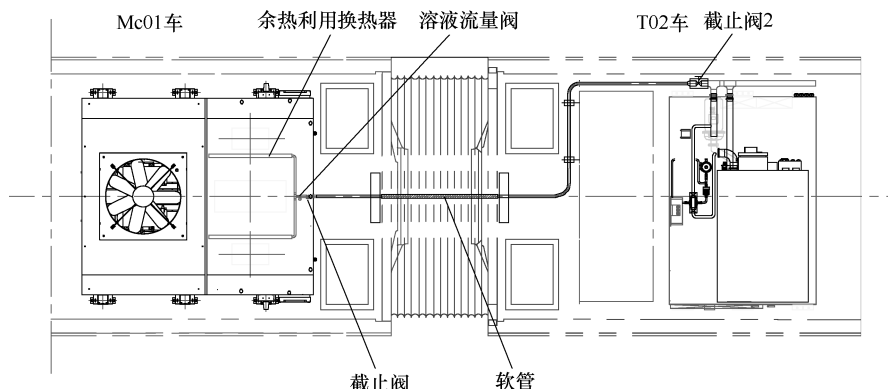


图 6-6-14 余热利用管路布置

(3) 与燃料电池换热器并联

燃料电池水箱内的溶液在循环泵的作用下送入空调机组内的余热回收换热器和 4 个室外侧换热器进行降温，降温后的溶液经过过滤器和去离子装置后送入燃料电池箱，带走燃料电池箱热量后返回储液水箱，完成循环，如图 6-6-15 所示。

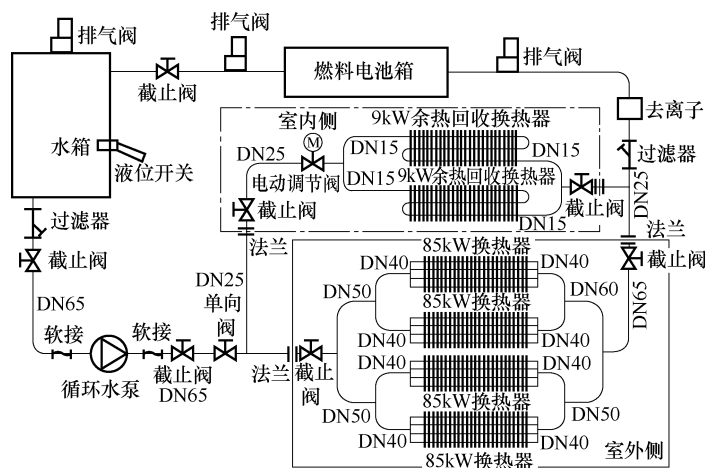


图 6-6-15 余热回收换热器与室外侧换热器的并联连接



机组内余热回收换热器共2个，每个额定换热量为9kW，额定流量为 $1 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，采用DN25管路，通过设置电动调节阀调节溶液循环量，做到调节换热量。需要降温时，电动调节阀关闭，室内侧换热器不进行换热。

(4) 余热采暖的控制

余热回收换热器的换热量与通过换热器的溶液流量有关，增大换热器流量可增大换热量。在换热器溶液管设置电动调节阀。根据回风温度与设定温度之间的关系动态调节电动调节阀，进而调节通过换热器的溶液流量，实现换热量的调节。

(5) 节能降耗

余热采暖利用燃料电池电堆散发的废热，为客室冬季供暖，节省了正常供暖所需消耗的大部分电能。余热采暖相对正常空调热泵供暖，压缩机和冷凝风机不需运行，只需蒸发风机正常运行，向客室内吹送热风。这可降低压缩机和冷凝风机的耗电量和设备损耗，延长设备寿命。



7.1 动力电池的基本构成及性能指标

7.1.1 动力电池的类型

动力电池是新能源汽车的动力源，也是能量的存储装置，其分类方式如图 7-1-1 所示。

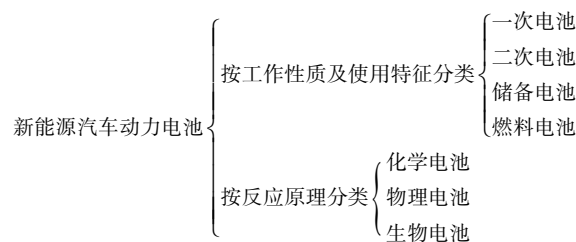


图 7-1-1 动力电池分类

(1) 按工作性质及使用特征分类

- 1) 一次电池。又称原电池（俗称干电池），即放电后不能再充电复原的电池，如锌锰电池、碱性锌锰电池等。一次电池由正极、负极、电解质、容器和隔膜等组成。
- 2) 二次电池。又称蓄电池，指放电后可通过充电使活性物质复原而继续使用的电池。这种电池的充放电次数可达数十次到上千次，如铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂电池、锂聚合物电池、锂铁电池等。
- 3) 燃料电池。又称连续电池，指参加反应的活性物质从电池外部连续不断地输入电池，电池则连续不断地输出电能，如质子交换膜燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池等。
- 4) 储备电池。这种电池的正负极与电解质在储存期间不直接接触，使用前注入电解质或使用其他方法使电解质与正负极接触，此后进入待放电状态，如镁电池、热电池等。

(2) 按反应原理分类

- 1) 化学电池。化学电池是利用物质的化学反应发电的电池。按工作性质不同，分为原电池、蓄电池、燃料电池和储备电池；按电解质不同，分为酸性电池、碱性电池、中性电池、有机电解质电池、非水无机电解质电池、固体电解质电池等；按电池的特性不同，分为高容量电池、密封电池、高功率电池、免维护电池、防爆电池等；按正负极材料不同，分为锌锰电池系列、镍镉镍氢系列、铅酸电池系列、锂电池系列等。



2) 物理电池。物理电池是利用光、热、物理吸附等物理能量发电的电池,如太阳能电池、超级电容、飞轮电池等。

3) 生物电池。生物电池是利用生物化学反应发电的电池,如微生物电池、酶电池、生物太阳能电池等。

车用动力电池有传统的铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池和锂电池。在物理电池领域,超级电容已应用于新能源汽车。以氢为燃料的燃料电池也已应用于新能源汽车。

表 7-1-1 为几款主流动力电池的技术参数对比情况。可以看出,由于锂电池具有工作电压高、比能量大、循环寿命长、自放电率低、无记忆效应、无污染等优点,已成为新能源汽车厂家的首选。

表 7-1-1 几款主流动力电池的技术参数

技术参数	铅酸电池	镍镉电池	镍氢电池	锂电池	磷酸铁锂电池
单体电压/V	2	1.2	1.2	3.6~3.7	3.6
电压工作范围/V	1.7~2.2	1.0~1.4	1.0~1.4	3.0~4.2	3.0~3.3
比能量/(W·h/kg)	40	30~50	50~80	100~125	105~140
能量密度/(W·h/L)	70	150	200	240~300	300
循环寿命	400	500	500	1000	1500
高温特性	差	好	差	好	好
低温特性	差	好	好	好	差
自放电率/月	5%	15%~30%	25%~35%	5%~8%	10%
记忆效应	有	有	有	无	无
环保	有毒	有毒	略有污染	无毒	无毒
安全性	良好	优秀	好	差	优秀

表 7-1-2 为各款动力电池的价格对比及发展趋势。

表 7-1-2 动力电池价格对比及发展趋势

电池类别	价格	未来价格	备注(不含BMS)
镍氢电池	10~13元/W·h	目前价格的一半或更低	混合动力汽车
锂电池(混合动力汽车用)	7~9元/W·h	目前价格的一半或更低	混合动力汽车
锂电池(纯电动汽车用)	3~5元/W·h	目前价格的一半或更低	纯电动汽车

7.1.2 动力电池的基本构成

动力电池是一种把化学反应所释放的能量直接转变成直流电能的装置。要实现化学能转变成电能的过程,必须满足如下条件:

➤ 使化学反应中失去电子的氧化过程(在负极进行),得到电子的还原过程(在正极进行),分别在两个区域进行,这与一般的氧化还原反应存在区别。

➤ 两电极间必须具有离子导电性物质。



➤ 化学变化过程中, 电子的传递必须经过外线路。

为满足上述条件, 动力电池需包含以下组成部分。

1) 电解质。电解质拥有很高的、选择性的离子电导率, 为电池内部的离子导电提供介质。大多数电解质为无机电解质水溶液, 也有固体电解质、熔融盐电解质、非水溶液电解质和有机电解质。有的电解质也参加电极反应而被消耗。电解质对电子来说必须是非导体, 否则会产生电池单体的自放电现象。

2) 正极活性物质。正极活性物质具有较高的电极电位, 电池放电时进行还原反应或阴极过程。为与电解槽的阳极、阴极区别开, 在电池中称正极。表 7-1-3 为锂离子电池正极材料对比情况。

表 7-1-3 锂离子电池正极材料对比

	钴酸锂	镍钴锰酸锂	锰酸锂	磷酸铁锂	镍钴铝酸锂	镍酸锂
分子式	LiCoO_2	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$	LiMn_2O_4	LiFePO_4	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	LiNiO_2
电压平台/V	3.7	3.6	3.8	3.3	3.7	2.5~4.1
比容量/mA	150	160	120	150	170	190
优点	充放电稳定, 生产工艺简单	电化学性能稳定, 循环性能好	锰资源丰富, 价格较低, 安全性能好	高安全性, 环保, 使用寿命长	高能量密度, 低温性能好	无充放电限制, 自放电率低, 环境污染少, 对电解液的要求低
缺点	钴价格昂贵, 循环寿命低	用到一部分金属钴, 价格昂贵	能量密度低, 电解质相容性差	低温性能差, 放电电压低	高温性能差, 安全性能差, 生产技术门槛高	—

3) 负极活性物质。负极活性物质具有较低的电极电位, 电池工作时进行氧化反应或阳极过程。为与电解槽的阳极、阴极区别开, 在电池中称负极。表 7-1-4 为锂离子电池负极材料对比情况。

表 7-1-4 锂离子电池负极材料对比

负 极 材 料	比容量/(mA·h/g)	首次效率 (%)	循环寿命/次	安 全 性	快 充 特 征
天然石墨	340~370	90	1000	一般	一般
人造石墨	310~360	93	1000	一般	一般
中间相炭微球	300~340	94	1000	一般	一般
石墨烯	400~600	30	10	一般	差
钛酸锂	165~170	99	30000	最高	最好
硅	800	60	200	差	差
锡纸	600	60	200	差	差



4) 隔膜。为保证正、负极活性物质绝对不因直接接触而短路，同时保持正、负极间尽可能小的距离，使电池具有较小的内阻，在正、负极间必须设置隔膜。隔膜材料都具有良好的绝缘性能，如橡胶、玻璃丝、聚丙烯、聚乙烯、聚氯乙烯等，以防止正、负极间的电子传递和接触。同时，隔膜材料要能耐电解质的腐蚀和正极活性物质的氧化作用。此外，隔膜还要有足够的孔隙率和吸收电解质溶液的能力，以保证离子运动。

5) 外壳。作为容器，电池的外壳材料必须能经受电解质的腐蚀，且应具有一定的机械强度。铅酸电池一般采用硬橡胶。碱性蓄电池一般采用镀镍钢材。近年来，随着塑料工业的发展，各种工程塑料，如尼龙、ABS、聚丙烯、聚苯乙烯等，已成为电池壳体常用的材料。

除上述组成部分外，动力电池通常还需要导电栅、汇流体、端子、安全阀等部件。

7.1.3 动力电池及电池组的相关概念

1) 电池单体 (Cell)。电池单体指直接将化学能转化为电能的基本装置和基本单元。电池单体是构成动力电池的基本元件，包括电极、隔膜、电解质和外壳等。

2) 电池 (Battery)。电池指由 1 个以上的电池单体并联或串联而成，封装在 1 个物理上独立的电池壳体内，具有独立的正极和负极输出的装置。

3) 电池组 (Battery Pack)。电池组也称电池包，是由多块电池通过串联或并联构成的存储电能或对外输出电能的部件。通常意义上的电池组还包括动力电池管理系统、电池箱等元器件。不包含完整电池管理功能的电池组，通常称为电池模块 (Battery Module)。

4) 电池系统 (Battery System)。电池系统指由 1 个以上电池组通过串联或并联构成的，具备完善电池管理系统的电能供给系统。

7.1.4 动力电池的性能指标

动力电池作为新能源汽车的储能装置，在新能源汽车上发挥着非常重要的作用，要评定动力电池的实际效应，主要是看其性能指标。动力电池的性能指标主要有电压、容量、内阻、能量、功率、输出效率、自放电率、放电倍率、使用寿命等。根据动力电池种类不同，其性能指标也有差异。

(1) 电压

电压分为电动势、端电压、额定电压、开路电压、工作电压、充电电压、充电终止电压、放电终止电压和电压效率等。动力电池电压各项性能指标的描述见表 7-1-5。

表 7-1-5 动力电池电压各项性能指标的描述

性能指标	概念	备注
电动势	又称电池标准电压或理论电压，为组成电池的两个电极的平衡电位之差	电动势是根据热力学函数计算得到的，是电池理论上输出能量大小的量度之一。如果其他条件相同，则电动势越高的电池，理论上能输出的能量就越大，使用价值就越高 充电后的铅酸电池的电动势一般为 2.1V，银锌电池的电动势为 1.85V，锂电池的电动势为 4.25V，镍氢电池的电动势为 1.5V



(续)

性能指标	概念	备注
端电压	指电池正极与负极之间的电位差	由于电池内阻的存在，端电压一般低于电动势
额定电压	指电池在规定条件下工作时应达到的标准电压	额定电压是该电化学体系的电池工作时公认的标准电压。如锌锰干电池额定电压为 1.5V，镍镉电池和镍氢电池为 1.2V，铅酸电池为 2V，锂电池为 3.6V
开路电压	指电池在没有负载情况下的端电压	电池的开路电压是实际测量出来的，开路电压不等于电动势
工作电压	电池在某负载下实际的放电电压	铅酸蓄电池的工作电压为 1.8 ~ 2V，镍氢电池的工作电压为 1.1 ~ 1.5V，锂电池的工作电压为 2.75 ~ 3.6V
充电电压	指外电路直流电压对电池充电的电压	一般的充电电压要高于电池的开路电压，如镍镉电池的充电电压为 1.45 ~ 1.5V，锂电池的充电电压为 4.1 ~ 4.2V
充电终止电压	指蓄电池充足电时，极板上的活性物质已达到饱和状态的电压	例如，镍镉电池的充电终止电压为 1.75 ~ 1.8V，镍氢电池的充电终止电压为 1.5V，锂电池的充电终止电压为 4.25V
放电终止电压	指电池放电时允许的最低电压	如果电压低于放电终止电压后电池继续放电，则电池两端电压会迅速下降，形成深度放电。极板上的生成物在正常充电时就不易再恢复，从而影响电池的寿命。放电终止电压和放电率有关，放电电流直接影响放电终止电压。在规定的放电终止电压下，放电电流越大，电池的容量越小 例如，镍镉电池、镍氢电池、锂电池的放电终止电压大致为 1.0 ~ 1.1V、1V、3.0V
电压效率	指电池的工作电压与电池电动势的比值	电池放电，电化学极化、浓差极化和欧姆压降会使电池的工作电压低于电动势。改进电极结构（包括真实表面积、孔率、孔径分布、活性物质粒子的大小等）和加入添加剂（包括导电物质、膨胀剂、催化剂、疏水剂等）是提高电池电压效率的两个重要途径

实际运用过程中，应注意动力电池各性能指标对应的数值。以铅酸电池为例，电动势为 2.1V，额定电压为 2V，开路电压接近 2.1V，工作电压为 1.8 ~ 2V，放电终止电压为 1.5 ~ 1.8V。在放电过程中，电压还会逐渐降低，如图 7-1-2 所示。

(2) 容量

电池在一定的放电条件下所能放出的电量称为动力电池的容量。常用单位为 $A \cdot h$ ，它等于放电电流与放电时间的乘积。

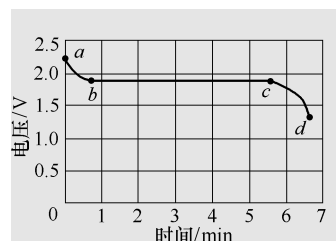


图 7-1-2 铅酸电池放电特性



动力电池的容量可分为理论容量、实际容量、标称容量和额定容量等。

理论容量指假设电极活性物质全部参加电池的化学反应所能提供的电量，是按法拉第定律计算得到的最高理论值。为比较不同系列的动力电池，常用比容量的概念，即单位体积或单位质量电池所能输出的理论电量，单位为 $A \cdot h/L$ 或 $A \cdot h/kg$ 。

实际容量指动力电池在一定条件下所能输出的电量，等于放电电流与放电时间的乘积，单位为 $A \cdot h$ ，其值小于理论容量。动力电池的实际容量主要与电池正、负极活性物质的数量及利用的程度（利用率）有关，而活性物质利用率主要受放电制度、电极结构和制造工艺的影响。放电制度指放电速率、放电形式、终止电压和温度。高速率即大电流。低温条件下放电会减少动力电池输出的容量。电极的结构包括电极高宽比例、厚度、孔隙率及导电栅网的形式。实际容量反映了动力电池实际存储电量的大小。动力电池容量越大，新能源汽车的续航里程就越远。

在使用过程中，动力电池的实际容量会逐渐衰减。国家标准规定新出厂的动力电池实际容量大于额定容量值为合格。

标称容量是用来鉴别动力电池的近似安时值。在指定放电条件下，一般指 $0.2C$ 放电时的放电容量。

额定容量是按国家或有关部门颁布的标准，保证电流在一定的放电条件下应放出的最低限度的容量。

按照 IEC 标准和国标，镍镉电池和镍氢电池在 $(20 \pm 5)^\circ C$ 条件下，以 $0.1C$ 充电 $16h$ 后，再以 $0.2C$ 放电至 $1.0V$ 时所放出的电量为动力电池的额定容量，以 C 表示。锂电池在常温、恒流 ($1C$)、恒压 ($4.2V$) 条件下充电 $3h$ 后，再以 $0.2C$ 放电至 $2.75V$ 时所放出的电量为动力电池的额定容量。

荷电状态 (SOC) 指动力电池在一定放电倍率下，剩余电量与相同条件下额定容量的比值，它反映了动力电池容量的变化。 $SOC = 1$ 即表示动力电池充满状态。随着动力电池放电，动力电池内的电荷逐渐减少，此时动力电池的充电状态，可用 SOC 的百分数的相对量来表示。一般动力电池放电高效率区为 $50\% \sim 80\% SOC$ 。

(3) 内阻

一般指充电态内阻，即动力电池充满电时的内阻（与之对应的是放电态内阻，指动力电池充分放电后的内阻。放电态内阻一般比充电态内阻大，且不太稳定）。动力电池内阻越大，其自身消耗能量越多，动力电池的使用效率越低。内阻很大的动力电池在充电时发热很严重，使动力电池的温度急剧上升，对动力电池和充电器的影响都很大。随着动力电池使用次数的增多，由于电解质的消耗及动力电池内部化学物质活性的降低，动力电池的内阻会有不同程度的升高。动力电池的内阻不是常数，在放电过程中随时间不断变化，因为活性物质的组成、电解质浓度和温度都在不断改变，需要用专门的仪器才能测量出比较准确的结果。

动力电池内阻包括欧姆电阻和极化电阻，二者之和为动力电池的全内阻。欧姆电阻主要由电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成。极化电阻是化学电源的正极、负极进行电化学反应时极化引起的内阻。极化内阻与活性物质的本性、电极的结构、动力电池的制造工艺有关，尤其与动力电池的工作条件有关，放电电流和温度对其影响很大。在大电流密度下放电时，电化学极化和浓差极化均增加，甚至可能引起负电极化，极化内阻增加。低温对电化学极化、离子扩散均有不利影响，故在低温条件下动力电池的极化内阻也



增加。因此,极化内阻并非常数,而是随放电率、温度等条件的改变而改变。

内阻使动力电池放电时的端电压低于电动势和开路电压,充电时端电压高于电动势和开路电压。

各种规格和型号的动力电池内阻不尽相同。在低倍率放电时,内阻对动力电池性能的影响不显著。但在高倍率放电时,动力电池全内阻明显增大,电压降损失可达数百毫伏。

(4) 能量

动力电池的能量指在一定放电制度下,动力电池所能输出的电能,单位是 $W \cdot h$ 或 $kW \cdot h$,也可简写为 $kW \cdot h$ 。它影响新能源汽车或轨道车辆的行驶距离。能量分为理论能量、实际能量、比能量和能量密度。理论能量是动力电池的理论容量与额定电压的乘积,指一定标准所规定的放电条件下,即假设动力电池在放电过程中始终处于平衡状态,其放电电压保持电动势的数值,且活性物质的利用率为 100% 时,动力电池所输出的放电容量。实际能量是动力电池实际容量与平均工作电压的乘积,表示在一定条件下动力电池所能输出的能量。

比能量也称质量比能量,指动力电池单位质量所能输出的电能,单位是 $W \cdot h/kg$,常用比能量来比较不同的动力电池系统。

能量密度也称体积比能量,指动力电池单位体积所能输出的电能,单位是 $W \cdot h/L$ 。

动力电池的比能量是综合性指标,它反映了动力电池的技术水平。动力电池的比能量影响新能源汽车的整车质量和续驶里程,是评价新能源汽车的动力电池是否满足预定续驶里程的重要指标。

(5) 功率

动力电池的功率指动力电池在一定放电条件下,单位时间内所输出能量的大小,单位为 W 或 kW 。动力电池的功率决定了新能源汽车的加速性能和爬坡能力。功率分为比功率和功率密度。比功率指单位质量动力电池所能输出的功率,也称质量比功率,单位为 W/kg 或 kW/kg 。功率密度指单位体积动力电池所能输出的功率,也称体积比功率,单位为 W/L 或 kW/L 。

动力电池的比功率影响新能源汽车的加速性能和坡道运行能力,是评价新能源汽车的动力电池是否满足预定起动加速度和坡道运行能力的重要指标。

(6) 输出效率

动力电池作为能量存储器,充电时把电能转化为化学能储存起来,放电时把化学能转化为电能释放出来。在这个可逆的电化学转换过程中,有一定的能量损耗,通常用动力电池的容量效率和能量效率来表示。

容量效率指动力电池放电时输出的容量与充电时输入的容量之比。影响动力电池容量效率的主要因素是副反应。动力电池充电时,有一部分电量消耗在水的分解上。此外,自放电、电极活性物质的脱落、结块、孔隙收缩等也会降低容量效率。

能量效率指动力电池放电时输出的能量与充电时输入的能量之比。影响能量效率的原因是动力电池存在内阻,它使动力电池充电电压升高,放电电压下降。内阻的能量损耗表现为动力电池发热。

(7) 自放电率

动力电池的自放电指动力电池在存储期间容量降低的现象。自放电率指动力电池在存放



期间容量的下降率，即动力电池无负荷时自身放电使容量损失的速度。自放电率用单位时间容量降低的百分数表示。

动力电池无负荷时因自行放电使容量损失。自放电通常集中在负极，因为负极活性物质多为活泼的金属粉末，在水溶液中可发生置换氢气的反应。若在电极中存在氢超电势（氢电极发生极压反应的超电势）低的金属杂质，则这些金属杂质和负极活性物质能组成腐蚀微电池，导致负极金属自行溶解，并伴有氢气析出，从而容量减少。在电解液中，杂质同样有害。正极的自放电量一般不大。正极为强氧化剂，若在电解液中或隔膜上存在易被氧化的杂质，则也会引起正极活性物质还原，从而减少容量。

自放电率用单位时间容量降低的百分数表示。

$$\text{自放电率} = \frac{C_a - C_b}{C_a T} \quad (7-1-1)$$

式中， C_a ——动力电池存储前的容量，单位为 $A \cdot h$ ；

C_b ——动力电池存储后的容量，单位为 $A \cdot h$ ；

T ——动力电池储存的时间，常用天或月计算。

(8) 放电倍率

动力电池放电电流的大小常用放电倍率表示，而动力电池的放电倍率用放电时间表示，即以一定的放电电流放完额定容量所需的小时数。放电时间越短，即放电倍率越高，则放电电流越大。放电倍率等于额定容量与放电电流之比。根据放电倍率的大小，可分为低倍率（ $<0.5C$ ）、中倍率（ $0.5 \sim 3.5C$ ）、高倍率（ $3.5 \sim 7.0C$ ）、超高倍率（ $>7.0C$ ）。例如，某电池的额定容量为 $40Ah$ ，若用 $8A$ 电流放电，则放完 $40Ah$ 的额定容量需用 $5h$ ，也就是说以 0.2 倍率放电，用符号 $C/5$ 或 $0.2C$ 表示，为低倍率放电。

(9) 放电深度

放电深度指放电容量与总放电容量的百分比，简称 DOD（Depth of Discharge）。放电深度表示放电程度的一种量度，其高低跟二次电池的充电寿命有直接关系。二次电池放电深度越大，其充电寿命就越短，因此在使用时应尽量避免深度放电。

(10) 寿命

动力电池的寿命分储存寿命和使用寿命。储存寿命又可分为“干储存寿命”和“湿储存寿命”。对于在使用时才加入电解液的动力电池储存寿命，一般称作干储存寿命。干储存寿命可以很长。对于出厂前已加入电解液的动力电池储存寿命，一般称作湿储存寿命。湿储存时自放电严重，寿命较短。使用寿命指动力电池在规定条件下的有效寿命期限。动力电池发生内部短路或损坏而不能使用，以及容量达不到规范要求时，表明其已失效，使用寿命终止。

对于一次电池，其寿命表征给出额定容量的工作时间（与放电倍率大小有关）。对于二次电池，其寿命分充放电循环寿命和湿搁置使用寿命两种。充放电循环寿命指在一定的充放电制度下，动力电池容量降至某一规定值前，动力电池能耐受的充放电次数。充放电循环寿命越长，动力电池的性能越好。充放电循环寿命与放电深度、温度、充放电制式等条件有关。降低放电深度，即浅放电，可有效延长二次电池的充放电循环寿命。

随着充放电次数的增加，二次电池容量衰减现象较为明显。这是因为在充放电循环过程中，二次电池内部会发生一些不可逆反应，引起二次电池放电容量的衰减。不可逆反应主要



包括:

- 电极活性表面积在充放电循环过程中不断减小, 使工作电流密度上升, 极化增大。
- 电极上活性物质脱落或转移。
- 动力电池工作过程中, 某些电极材料发生腐蚀。
- 隔膜的老化和损耗。
- 在循环过程中, 电极上生成枝晶, 造成动力电池内部微短路。
- 活性物质在充放电过程中发生不可逆晶形改变, 使活性降低。

常用动力电池的循环使用寿命作为动力电池使用寿命的一项重要评价指标。动力电池的循环使用寿命指动力电池以充放电一次为一个循环过程, 在一定测试标准下, 动力电池容量下降到某一规定值前, 其所经历的充放电循环总次数。

我国规定为达到额定容量的 80%, 在实际应用中常用使用年限和动力电池 SOH 反映动力电池使用寿命。

(11) 化成

动力电池制成后, 需要对电芯进行小电流充电, 将其内部正负极物质激活, 在负极表面形成一层钝化层——SEI (Solid Electrolyte Interface) 膜, 使动力电池性能更加稳定。动力电池经过化成后才能发挥全部性能。化成过程中的分选过程能提高动力电池组的一致性, 使最终动力电池组的性能提高。化成容量是筛选合格动力电池的重要指标。

除此之外, 成本也是一个重要指标, 新能源汽车发展的瓶颈之一就是动力电池价格过高。

7.1.5 电动车辆对动力电池的要求

(1) 电动车辆驱动力的主要影响因素

电动车辆 (这里指混合动力汽车、纯电动汽车和混合动力有轨电车) 由动力电池组输出电能给驱动电机, 驱动电机输出功率, 这些功率用于克服电动车辆本身的机械装置内阻力以及由行驶条件决定的外阻力, 实现能量的转换和车辆驱动。

电动车辆机械传动装置指与驱动电机输出轴有运动学联系的减速齿轮传动箱或变速器、传动轴及主减速器等机械装置。机械传动链中的功率损失主要有齿轮啮合处的摩擦损失、轴承中的摩擦损失、旋转零件与密封装置之间的摩擦损失, 以及搅动润滑油的损失等。

电动车辆行驶方程式为:

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (7-1-2)$$

式中, F_t ——驱动力, 单位为 N;

F_f ——滚动阻力, 单位为 N;

F_w ——空气阻力, 单位为 N;

F_i ——坡度阻力, 单位为 N;

F_j ——加速阻力, 单位为 N。

可见, 车辆的驱动力应与其行驶阻力平衡。

电动车辆的滚动阻力

$$F_f = mf \quad (7-1-3)$$



式中, m ——汽车质量, 单位为 kg;

f ——滚动阻力系数。

电动车辆的空气阻力

$$F_w = \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \quad (7-1-4)$$

式中, C_D ——空气阻力系数;

A ——迎风面积, 单位为 m^2 ;

u_a ——电动车辆的行驶速度, 单位为 m/s。

电动车辆的坡度阻力

$$F_i = G \sin \alpha \quad (7-1-5)$$

式中, α ——坡角, 单位为 $(^\circ)$ 。

电动车辆的加速阻力

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt} \quad (7-1-6)$$

式中, δ ——电动车辆的旋转质量换算系数;

m ——电动车辆的质量, 单位为 kg;

$\frac{du}{dt}$ ——行驶加速度, 单位为 m/s^2 。

(2) 电动车辆对动力电池的能量和功率需求

驱动车辆所需的功率为:

$$P_v = u_a (F_f + F_w + F_i + F_j) \quad (7-1-7)$$

动力电池组所需功率为:

$$P_B = P_v / \varepsilon_M \varepsilon_E \quad (7-1-8)$$

式中, ε_M ——电动车辆传动系统机械效率;

ε_E ——电动车辆电气部件效率。

纯电动车辆行驶完全依赖动力电池组的能量, 动力电池组能量越大, 可实现的续驶里程越长, 但动力电池组的体积、重量也越大。纯电动道路车辆要根据设计目标、道路情况和运行工况的不同来选配动力电池。具体要求归纳如下:

1) 动力电池组要有足够的能量和容量, 以保证典型的连续放电不超过 1C, 典型峰值放电一般不超过 3C。如果电动车辆上安装了回馈制动装置, 则动力电池组必须能接受高达 5C 以上的脉冲电流充电。

2) 动力电池要能实现深度放电 (如 80% DOD) 而不影响其使用寿命, 必要时能实现满负荷功率和全放电。

3) 需要安装电池管理系统和热管理系统, 显示动力电池组的剩余容量并实现温度控制。

4) 由于动力电池组的体积、质量大, 动力电池箱的设计、动力电池的空间布置和安装问题都需要根据整车的空间、前后轴荷的配比进行具体设计。

(3) 新能源汽车对动力电池的能量和功率需求

与纯电动汽车相比, 混合动力汽车对动力电池的能量要求有所降低, 但要能根据整车要



求实时提供更大的瞬时功率，即实现“小电池提供大电流”。由于混合动力汽车构型的不同，串联式和并联式混合动力汽车对动力电池的要求又有差别。

1) 串联式混合动力汽车完全由电动机驱动，内燃机-发电机与动力电池组一起提供电动机需要的电能，动力电池 SOC 处于较高水平，对动力电池的要求与纯电动汽车相似，但容量要求小，功率特性要求根据整车需求与动力电池容量确定。总体而言，动力电池容量越小，对其大倍率放电的要求越高。

2) 并联式混合动力汽车内燃机和电动机可直接为车轮提供驱动力，整车的驾驶需求可通过不同的动力组合来满足。动力电池组瞬时提供的功率要满足汽车加速或爬坡要求，动力电池的最大放电电流有时可达 20C 以上。

插电式混合动力汽车 (PHEV) 在应用上期望纯电动工作模式的续驶里程达到 40km 以上，且兼具混合动力驱动功能，因此要求动力电池兼顾纯电动和混合动力两种模式。同时，由于在应用模式上是在纯电动行驶到电量不足时，才启动混合动力驱动工况，这就需要动力电池组在低 SOC 时也能提供很高的功率。

现有的燃料电池电动汽车由于燃料电池功率密度较低，一般采用与动力电池共同驱动的方式对外输出电能。在燃料电池与动力电池连接方式上，也有并联和串联两种形式，这类车型对动力电池性能的要求与混合动力汽车相似。

(4) 电动车辆用动力电池的评价参数

电动车辆对动力电池组的主要要求如下：

1) 比能量高。高能量对电动车辆而言，意味着更长的纯电动续驶里程。作为交通工具，延长续驶里程可有效提升车辆应用的方便性，并扩展适用范围。为提高电动车辆的续驶里程，要求动力电池组尽可能多的储存能量，但电动车辆又不能太重，其安装动力电池组的空间也有限，这就要求动力电池组具有高比能量。

2) 比功率大。为使电动车辆在加速、爬坡和负载等方面能与燃油汽车相竞争，就要求动力电池组具有高的比功率。长期大电流、高功率放电对动力电池组的使用寿命和充放电效率会产生负面影响，甚至影响动力电池组使用的安全性，因此在功率方面还需要一定的功率储备，避免让动力电池组在全功率工况下工作。

3) 充放电效率高，循环寿命长。动力电池组中能量的循环必须经过充电—放电—充电的快速充放电循环过程，高充放电效率对保证整车效率具有至关重要的作用。要求充电技术成熟，充电时间短，且动力电池组的循环寿命不低于 1000 次。

4) 使用成本低。除降低动力电池组的初始购买成本外，还要提高动力电池组的使用寿命以延长其更换周期。

5) 安全性好。动力电池组不允许自燃，在发生碰撞等事故时，不会燃烧，不会对乘员造成伤害。

6) 工作温度适应性强。电动车辆的应用一般不受地域限制，在不同的空间和时间应用，需要电动车辆适应不同的温度。仅以北京地区的车辆应用为例，北京夏季地表温度可达 50℃ 以上，冬季可低至 -15℃ 以下，在该温度变化范围内，动力电池应可正常工作。这就需要动力电池具有良好的温度适应性。在进行动力电池系统设计时，一般需要设计相应的冷却系统或加热系统，以保证动力电池的最佳工作温度，解决动力电池的温度适应性问题。



7) 可回收性好。按照动力电池使用寿命的标准定义,动力电池在其容量衰减到额定容量的 80% 时,确定为寿命终结。随着电动车辆的大量应用,必然出现大量废旧动力电池的回收问题。这就要求动力电池正负极及电解液等材料无毒,对环境无污染,动力电池内部各种材料可回收再利用。动力电池的再利用还存在梯次问题,将按照实际容量衰减至额定容量 80% 以下标准淘汰的动力电池组转移到对动力电池容量和功率要求相对较低的领域继续应用。

动力电池最重要的特点就是高功率和高能量。高功率意味着更大的充放电强度,高能量表征更高的质量比能量和体积比能量。这两个指标的要求其实是矛盾的,为提高功率就要提高充放电电流,动力电池结构要求设计为增大等效的反应面积和减少接触阻抗,要求增大体积和质量,从而降低比能量。动力电池系统需要按照最优化的整车设计应用指标设计。

2010 年,我国工业和信息化部颁发了先进动力电池系统的规格和等级:

- 工作温度为 $-20 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 。
- 储存和运输温度为 $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。
- 比能量 $\geq 90\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$ (以动力电池组总体计)。
- 最大放电倍率 $\geq 5\text{C}$ 。
- 最大充电倍率 $\geq 3\text{C}$ 。
- 循环寿命 ≥ 2000 次 (单体), 1200 次 (系统)。

美国能源部 (DOE)/新生代汽车联合体 (PNGV) 对混合动力汽车用动力电池的性能要求见表 7-1-6。

表 7-1-6 美国能源部 (DOE)/新生代汽车联合体 (PNGV)
对混合动力汽车用动力电池的性能要求

性 能	并联式 (最小值)	串联式 (最小值)
脉冲放电功率 (18s)/kW	25	65
充电脉冲功率 (10s)/kW	30	70
总能量/kW · h	0.3	3.0
最低效率 (%)	90	95
使用年限	10	10
最大质量/kg	40	65
操作电压范围/V	300 ~ 400	300 ~ 400
操作温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	$-40 \sim 52$	$-40 \sim 52$
最大允许自放电量/(kW · h/天)	50	50

7.2 锂电池结构与工作原理

自锂电池问世以来,围绕它的研究、开发工作一直不断地进行着。相比铅酸电池、镍氢电池等电池,锂电池在比功率、比能量方面有明显的优势,因此被视作动力电池的首选。



7.2.1 锂电池的种类与特点

(1) 锂电池的种类

根据锂电池所用电解质材料不同,可分为液态锂电池(Lithium Ion Battery, LIB)和聚合物锂电池(Polymer Lithium Ion Battery, PLIB)两大类。

液态锂电池与聚合物锂电池所用的正负极材料和液态锂离子相同,工作原理也基本一致。正极一般使用 LiCoO_2 ,负极使用各种碳材料,如石墨,同时使用铝、铜作集流体。表7-2-1对两种锂电池的结构进行了对比分析。

表 7-2-1 锂电池结构比较

类 型	电 解 质	壳体/包装	隔 膜	电 流 体
液态锂电池	液态	不锈钢、铝	25 μPE	铜箔和铝箔
聚合物锂电池	胶体聚合物	铝/PP复合膜	没有隔膜或 μPE	铜箔和铝箔

液态锂电池与聚合物锂电池的主要区别在于电解质不同,液态锂电池使用的是液体电解质,而聚合物锂电池则使用固体聚合物电解质,这种聚合物可以是“干态”的,也可以是“胶态”的,目前大部分采用聚合物胶体电解质。

液态锂电池指 Li^+ 嵌入化合物为正、负极的二次电池。正极采用锂化合物 LiCoO_2 、 LiNiO_2 或 LiMn_2O_4 ,负极采用锂-碳层间化合物 Li_xC_6 。

聚合物锂电池(Li-polymer,又称高分子锂电池),具有能量密度高、小型化、超薄化、轻量化和高安全性等多种特点。在形状上,聚合物锂电池具有超薄化特征,可配合各种产品的需要,制作成任何形状与容量。在安全性上,外包装为铝塑包装,有别于液态锂电池的金属外壳,内部质量隐患可立即通过外包装变形表现出来,一旦发生安全隐患,不会爆炸,只会膨胀。

聚合物锂电池使用了胶体电解质,不会像液体电解液那样泄漏,因此装配很容易,使电池整体很轻、很薄,也不会产生燃烧、爆炸等安全问题,可用铝塑复合薄膜制造电池外壳,从而提高整个电池的比容量。聚合物锂电池还可采用高分子做正极材料,其能量密度会比目前的液态锂电池高50%以上。此外,聚合物锂电池在工作电压、充放电循环寿命等方面都比液态锂电池高。

聚合物锂电池主要的构造包括正极、负极和电解质。正极材料包括导电高分子聚合物或一般锂电池所采用的无机化合物,电解质则可使用固态或胶态高分子电解质,或有机电解液。一般的锂电池使用液体或胶体电解液,因此需要坚固的二次包装来容纳可燃的活性成分,这就增加了重量,也限制了尺寸。而聚合物锂离子电池中没有多余的电解液,因此更稳定,也不易因过量充电、碰撞或其他损害及过量使用而导致危险情况。

(2) 聚合物锂电池的优势和劣势

聚合物锂电池可分为三类:

1) 固体聚合物电解质锂电池。电解质为聚合物与盐的混合物,这种电池在常温下的离子电导率低,适于高温时使用。

2) 凝胶聚合物电解质锂电池。即在固体聚合物电解质中加入增塑剂等添加剂,提高离子电导率,使电池可在常温下使用。



3) 导电聚合物锂电池。采用导电聚合物作正极材料,其比能量是现有锂电池的3倍,是最新一代锂电池。

聚合物锂电池的优势如下:

- 超薄,电池能组装到信用卡中。
- 质量轻,采用聚合物电解质的电池无需金属壳保护。
- 外形灵活,制造商不用局限于标准外形,能经济地做成合适的外形。
- 安全性能提升,过充更稳定,电解液泄漏的概率更低。

聚合物锂电池的局限性如下:

- 与一般锂电池相比,能量密度和循环次数都有下降。
- 制造成本很高。
- 没有标准外形,大多数电池为高容量消费市场而制造,价格/能量比较高。

(3) 磷酸铁锂动力电池

磷酸铁锂动力电池的全名是磷酸铁锂电池,指正极材料为磷酸铁锂(LiFePO_4)的锂电池,属于锂电池中的新兴产品。与较早应用的 LiCoO_2 、 LiMnO_4 、 LiNiMO_2 等锂电池相比,磷酸铁锂电池在循环寿命和安全性等方面具有明显优势,目前已成为新能源汽车行业和轨道交通行业应用较多的电池产品。它的性能可满足多数动力性方面的应用需求,因此名称中包含“动力”两字,即磷酸铁锂动力电池,也有人将其称为“锂铁动力电池”。

LiFePO_4 在自然界以磷铁锂矿的形式存在,属于橄榄石形结构。 LiFePO_4 实际最大放电容量可达 $165\text{mA} \cdot \text{h/g}$,非常接近其理论容量,工作电压为 3.2V 左右。此外, LiFePO_4 中的强共价键作用使其在充放电过程中能保持晶体结构的高度稳定性,因此具有比其他正极材料更高的安全性能和更长的循环寿命。 LiFePO_4 有原材料来源广泛、价格低廉、无环境污染、比容量高等优点,这使其成为现阶段各国研究的热点之一。

LiFePO_4 正极材料常用的合成方法有高温固相法和水热法。此方法工艺简单,易实现产业化,但产物粒径不易控制,形貌也不规则,且在合成过程中需要惰性气体保护。水热法可在水热条件下直接合成 LiFePO_4 。氧气在水热体系中的溶解度很小,因此水热合成不再需要惰性气体保护,且产物的粒径和形貌均易于控制。目前, LiFePO_4 正极材料的缺点主要是电导率低,有效的改进方法主要有表面包覆碳膜法和掺杂法。

7.2.2 锂电池的结构与工作原理

锂电池即分别用2个能可逆地嵌入与脱嵌锂离子的化合物作正负极构成的二次电池。锂电池靠锂离子在正负极之间的转移来完成充放电工作,因此又被形象地称为“摇椅式电池”,俗称锂电。图7-2-1所示为锂电池原理图。图7-2-2所示为锂离子充放电过程。

锂电池在原理上实际是一种锂离子浓差电池,正、负极由两种不同的锂离子嵌入化合物组成。通过 Li^+ 在正负极间的往返嵌入和脱嵌,形成电池的充电和放电过程。从充放电的可逆性看,锂电池反应是一种理想的可逆反应。锂电池的电极反应表达式如下。

正极反应式:



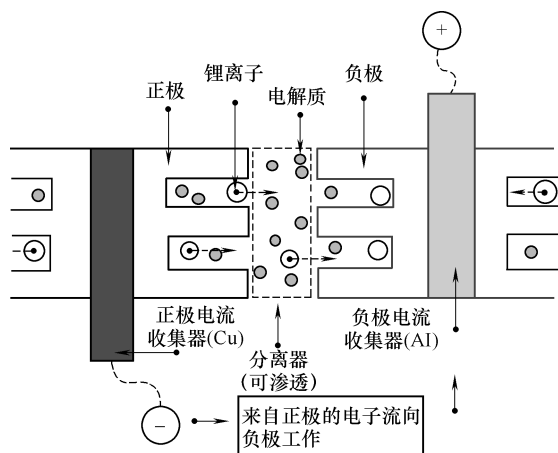


图 7-2-1 锂电池原理图

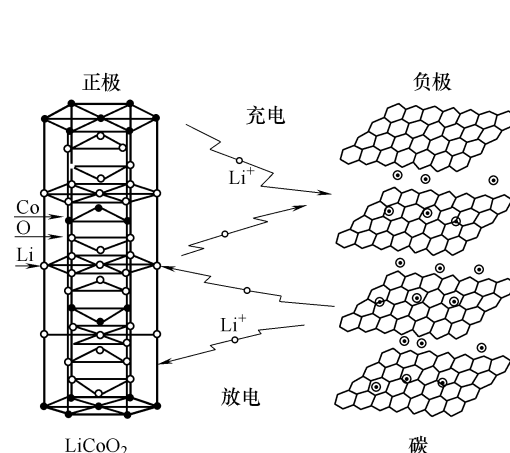


图 7-2-2 锂电池充放电过程

负极反应式：



电池反应式：



式中，M——Co、Ni、W、Mn 等金属元素。

锂电池的工作原理主要包括以下方面：

1) 充电时，锂离子从正极中脱嵌，在负极中嵌入，放电时反之。这就需要有一个电极在组装前处于嵌锂状态。一般选择相对锂而言，电位大于 3V 且在空气中稳定的嵌锂过渡金属氧化物作正极，如 Li_xCoO_2 、 Li_xNiO_2 、 $Li_xMn_2O_4$ 。

2) 作为负极的材料选择电位尽可能接近锂电位的可嵌入锂化合物，如各种锂碳层间化合物 Li_xC_6 ，包括天然石墨、合成石墨、碳纤维、中间相小球碳素等，以及金属氧化物，包括 S_nO 、 S_nO_2 、锡复合氧化物 $S_nB_xP_yO_z$ 等。

3) 电解质采用 $LiPF_6$ 的乙烯碳酸酯 (EC)、丙烯碳酸酯 (PC) 和低黏度二乙基碳酸酯 (DEC) 等烷基碳酸酯搭配的混合溶剂体系。

4) 充电过程中， Li^+ 正极脱嵌经过电解质嵌入负极，负极处于富锂态，正极处于贫锂态，同时电子的补偿电荷从外电路供给到碳负极，保持负极的电平衡。

5) 放电过程相反， Li^+ 从负极脱嵌，经过电解质嵌入到正极，正极处于富锂态，负极处于贫锂态。放电过程中，负极材料的化学结构基本不变。

6) 隔膜采用聚烯微多孔膜，如 PE、PP 或它们的复合膜，尤其是 PP/PE/PP 三层隔膜不仅熔点较低，还具有较高的抗穿刺强度，起到了热保险的作用。

7) 外壳采用钢或铝材料，盖体组件具有防爆断电的功能。

随着移动电子设备的迅速发展和能源需求的不断增大，人们对锂电池的需求也越来越多。锂电池具有容量高、电压适中、来源广泛以及其循环寿命长、成本低、无环境污染等特点，这使它不仅可应用于移动通信工具，还可成为电动车辆的动力电源。锂电池的使用类别见表 7-2-2。



表 7-2-2 锂电池的使用类别

电 池 类 型	应 用 领 域	特 点	电池性能要求
便携式电器电 池（高能量）	小型电器、信息、通信、 办公、教学、数字娱乐	电器更新快、2～3 年寿 命周期、恒功率工作，对电 池倍率性能、工作温度、成 本、循环性能要求不高	电池能量密度高于 150W·h/kg， 100% DOD 200～300 次
储能电池（长 寿命）	小型储能电源、UPS、太 阳能、燃料电池、风力发电 等独立电源系统储能	对电池功率和能量密度要 求不高，体积和重量要求相 对较低	0～20 年使用寿命，免维护，性能 稳定，价格低，较好的温度特性和 较低的自放电率
动力电池（高 功率）	各种电动车辆、电动工 具、大功率器具	要求高功率密度、安全 性、温度特性，成本、自放 电方面有较高的要求	目前水平：800～1500 W/kg，目 标 2000 W/kg 以上
微型电器	无线传感器、微型无人飞 机、植入式医疗装置、智能 芯片、微型机器人、集成 电器	电器维护困难，对稳定 性、寿命要求很高	要求寿命长，稳定性好

7.2.3 锂电池的充放电特性

锂电池充电从安全、可靠及兼顾充电效率等方面考虑，通常采用两段式充电方法。第一阶段为恒流限压，第二阶段为恒压限流。锂电池充电的最高限压值根据正极材料不同而有一定差别。

锂电池基本充放电电压曲线如图 7-2-3 所示。图中曲线采用的充放电电流均为 0.3C。对于不同的锂电池，区别主要有两点：

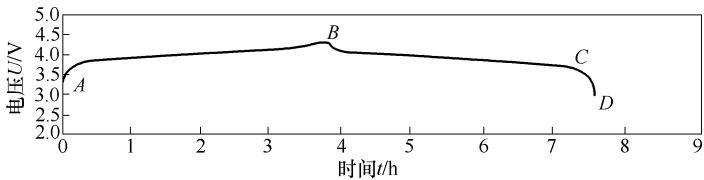


图 7-2-3 锂电池基本充放电电压曲线

- 1) 第一阶段恒流值，根据电池正极材料和制造工艺不同，最佳值存在一定差别。一般电流范围为 0.2～0.3C。
 - 2) 不同锂电池在恒流时间上存在很大差别，恒流可充入容量占总体容量的比例也存在很大差别。从电动车辆实际应用的角度，恒流时间越长，充电时间越短，更有利于应用。
- 锂电池放电在中前期电压稳定，下降缓慢，但后期电压下降迅速。在此阶段必须进行有效控制，防止过放电，避免对锂电池造成不可逆性损害。

(1) 充电特性的影响因素

- 1) 充电电流对充电特性的影响。在锂电池允许的充电电流范围内，增大充电电流，



虽然可恒流充入的容量和能量会减少,但有助于总体充电时间的减少。在实际电池组应用中,可用锂电池允许的最大充电电流充电,达到限压后,进行恒压充电,这样在减少充电时间的基础上,也保证了充电的安全性。但充电电流的增加,也会使锂电池内阻能量损耗增加。

大量试验证明,在充电过程中,锂电池的内阻变化不大于 $0.4\text{m}\Omega$,内阻能耗与充电时间基本呈线性关系,而同充电电流成平方关系。在充电初期,充电电流是内阻能耗的主要影响因素,电流大的能耗大。在此之后,充电时间是内阻能耗的主要影响因素,充电时间长的能耗大。对充电过程进行综合考虑,因为充电电流与内阻能耗成平方关系,是影响内阻能耗的主要因素,所以充电电流大的内阻能耗大。在实际应用中,应综合考虑充电时间和效率,选择适中的充电电流。

2) 放电深度对充电特性的影响。大量试验证明:

① 随放电深度增加,充电所需时间增加,但每单位容量所需的平均充电时间减少,即充电时间的增加与放电深度不成正比增加。

② 随放电深度增加,恒流充电时间所占总充电时间比例增加,恒流充电容量占所需充入容量的比例增加。

③ 随放电深度增加,等安时充放电效率有所降低,但降低幅度不大。

3) 充电温度对充电特性的影响。随环境温度降低,锂电池的可充入容量明显降低,而充电时间明显增加。低温 (-25°C) 和室温 (25°C) 两种情况下,相同的充电结束电流,可充入容量和能量降低约 $25\% \sim 30\%$ 。若以 5A 为充电结束标准,则锂电池仅充入在此温度下可充入容量或能量的 $75\% \sim 85\%$ 。但降低充电结束电流,就意味着充电时间的大幅增加。在冬季低温情况下,锂电池可充入容量低,因此,为防止锂电池过放电,必须降低单次充电电池的可用容量。

(2) 放电特性影响因素

在室温情况下对锂电池充电,在不同温度下放电,对锂电池可放出的能量的影响大于对锂电池放电容量的影响。在放出容量占可放出容量 $40\% \sim 50\%$ 时,单位安时放出的能量最多。在低温情况下,锂电池的放电电压较低,尤其在放电初期同样的放电电流下,锂电池电压会出现急剧下降,因此放电能量偏低。在放电中期,放电消耗在锂电池内阻上的能量使锂电池自身的温度升高,锂电池活性物质的活性增加,锂电池电压有所升高,因此可放出的能量增加。在放电后期,锂电池电压降低,单位时间放出的能量随之降低。

在同一温度,同样的放电终止电压下,不同的放电结束电流,可放出的容量和能量有一定差别。电流越小,可放出容量和能量越多。如上述放电试验, 0.05C 比 0.5C 可放出容量和能量增加约为 $5\% \sim 7\%$ 。

7.2.4 锂电池的充放电方法

锂电池充电通常应完成三个目标:

- 尽快使锂电池恢复额定容量,即在恢复锂电池容量的前提下,充电时间越短越好。
- 消除锂电池在放电使用过程中引起的不良后果,即修复深放电、极化等因素对锂电池的破坏。
- 对锂电池补充充电,克服锂电池自放电引起的不良影响。



20 世纪 60 年代中期,美国科学家马斯对开口蓄电池的充电过程做了大量试验研究,并提出了以最低出气率为前提的蓄电池可接受充电曲线,如图 7-2-4 所示。试验表明,如果充电电流按这条曲线变化,则可大大缩短充电时间,且对锂电池的容量和寿命没有影响。原则上把这条曲线称为铅酸电池的最佳充电曲线。此后,以此为基础,众多研究人员开展了各种电池的最佳充电曲线和方法方面的研究。

(1) 常规充电方法

1) 恒流充电法(图 7-2-5)。恒流充电方法通过调整充电装置输出电压,或改变与蓄电池串联电阻的方式,使充电电流强度保持不变。该方法控制简单,但锂电池的可接受电流能力会随充电过程的进行而逐渐下降。到充电后期,充电电流多用于电解水,产生气体,此时电能不能有效转化为化学能,多变为热能消耗掉,因此常选用分段电流充电法。

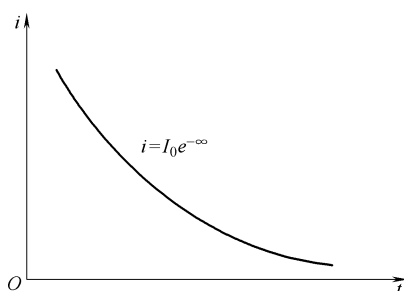


图 7-2-4 蓄电池的最佳充电曲线

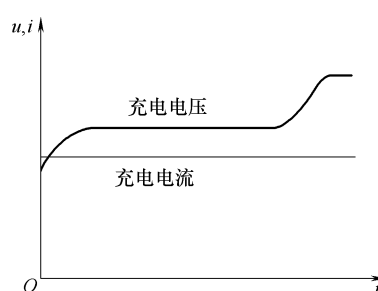


图 7-2-5 恒流充电法曲线

2) 恒压充电法。在蓄电池充电过程中,充电电源电压始终保持一定,称为恒压充电。

$$I = \frac{U - E}{R} \quad (7-2-4)$$

式中, U ——锂电池的端电压,单位为 V;

E ——锂电池电动势,单位为 V;

I ——充电电流,单位为 A;

R ——充电电路内阻,单位为 Ω 。

充电开始时,锂电池电动势小,充电电流很大,这会对其寿命造成很大影响,且容易使锂电池极板弯曲,造成锂电池报废。充电中后期,受锂电池极化作用的影响,正极电位变得更高,负极电位变得更低,因此电动势增大,充电电流过小,导致长期充电不足,影响锂电池的使用寿命。鉴于上述缺点,恒压充电很少使用,只有在充电电源电压低、工作电流大时才采用。例如,汽车运行过程中,启动锂电池就是以恒压充电法充电的。恒压充电法曲线如图 7-2-6 所示。

3) 阶段充电法。该方法由多种充电方法组合而成,如先恒流后恒压充电法、多段恒流充电法、先恒流再恒压最后恒流充电法等。常用的为先恒流再恒压的充电方式,如铅酸电池、锂电池就采用这种方式充电。

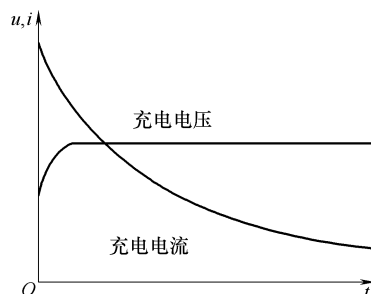


图 7-2-6 恒压充电法曲线



(2) 快速充电方法

为最大限度地加快锂电池的化学反应速度，缩短其达到充满电状态的时间，同时保证其正负极板的极化现象尽量少或轻，提高锂电池使用效率，快速充电技术近年来得到了迅速发展。为使充电曲线尽可能地逼近最佳充电曲线，研究者围绕最佳充电曲线设计了多种锂电池的快速充电方法。

1) 脉冲式充电法。脉冲式充电指充电电流或电压以脉冲的形式加在锂电池两端，如图 7-2-7 所示。脉冲快速充电法的理论基础是通过在充电电流中叠加一定频率、宽度、高度的负脉冲或短时间的中途停充电，以降低锂电池的浓差极化，允许加大充电电流，缩短充电时间。

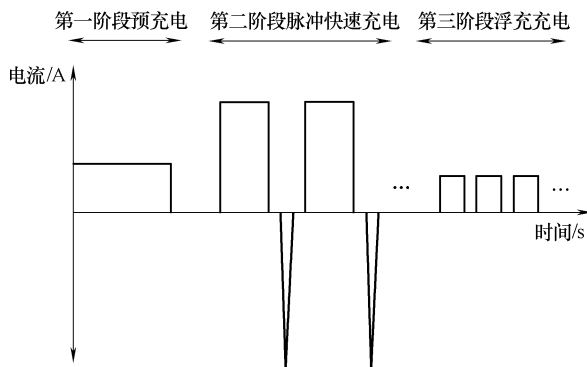


图 7-2-7 脉冲式充电法

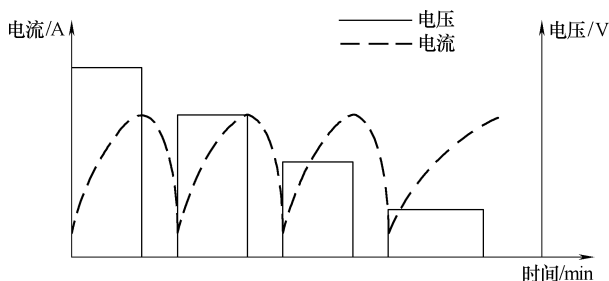


图 7-2-8 变电流间歇充电曲线

该方法首先用脉冲电流对锂电池充电，然后停充一段时间，再用脉冲电流对锂电池充电，如此循环。充电脉冲使锂电池充满电量，而间歇期使锂电池经化学反应产生的氧气和氢气有时间重新化合而被吸收，使浓差极化和欧姆极化现象自然而然地得到消除，从而减轻锂电池的内压，使下一轮的恒流充电能更加顺利地进行，使锂电池可吸收更多的电量。间歇脉冲使锂电池有较充分的反应时间，减少了析气量，提高了锂电池的充电电流接受率。

在充电初期，由于极化现象不明显，可采用额定容量的大电流进行定流充电，使锂电池在较短时间内充到额定容量的 50%~60%。当锂电池单体电压上升到一定的程度，水开始分解，有微量出气时停止充电。停充后，欧姆极化消失，浓差极化也会因扩散而部分消失。为消除电化学极化的电荷积累，消除极板微孔中形成的气体，并使浓差极化进一步消失，停充



后应采用放电或反充电，使锂电池通过一个与充电方向相反的大电流脉冲，然后再停充（约10ms）。脉冲深度为充电电流的0.5~2倍，脉冲宽度为5~30ms。此后的充电过程便一直按正脉冲充电—停充—负脉冲瞬间放电—停充—正脉冲充电这一过程循环，直至充足为止。这可使极化程度显著减慢，从而解决了快速充电影响锂电池寿命的问题。

2) 变电流间歇充电法（图7-2-8）。变电流间隙/定电压充电法在限定充电电压条件下，采用变电流间歇方式加大充电电流，加速充电过程，缩短时间，以充入更多电量。

这种充电法建立在恒流充电和脉冲充电的基础上，将恒流充电段改为限压变电流间歇充电段。充电前期采用变电流间歇充电法，保证加大充电电流，获得绝大部分充电量。充电后期采用定电压充电段，获得过充电量，将锂电池恢复至完全充电状态。通过间歇停充，使锂电池经化学反应产生的氧气和氢气有时间重新化合而被吸收，使浓差极化和欧姆极化现象自然而然地消除，从而减轻了锂电池的内压，使下一轮的恒流充电能更加顺利地进行，使锂电池可吸收更多电量。

该方法有3个要点：

- 限定充电电压，保证加大充电电流不损害锂电池。
- 用间歇分段充电方式加大充电电流值。
- 为充入尽可能多的电量，应采用逐次减少充电电流值的变电流模式。

3) 变电压间歇充电法（图7-2-9）。变电压间歇充电法以变电流间歇充电为基础，把变电流间歇充电中的变流改为变压，通过间歇停充，使锂电池化学反应产生的氧气有时间被重新化合吸收，从而减轻了锂电池的内压，使锂电池可吸收更多的电量。变电压间歇充电法与变电流间歇充电方法的不同之处在于第一阶段不是间歇恒流，而是间歇恒压。

比较图7-2-8和图7-2-9可以看出，图7-2-9更符合最佳充电的充电曲线。在每个恒电压充电阶段，由于是恒压充电，充电电流自然按指数规律下降，符合锂电池电流可接受率随充电过程逐渐下降的特点。

4) Reflex TM 快速充电法（图7-2-10）。这是美国的一项专利技术，最早主要面对的充电对象是镍镉电池，可缓解镍镉电池的记忆效应问题，并大大降低了蓄电池快速充电的时间。Reflex TM 充电法的一个工作周期包括正向充电脉冲（反向瞬间放电脉冲和停充维持三个阶段）。与脉冲式充电相比，加入了负脉冲的思想，这种充电法在其他类型蓄电池上的应用近年也大量开展，以提高充电速度并降低充电过程中的极化。

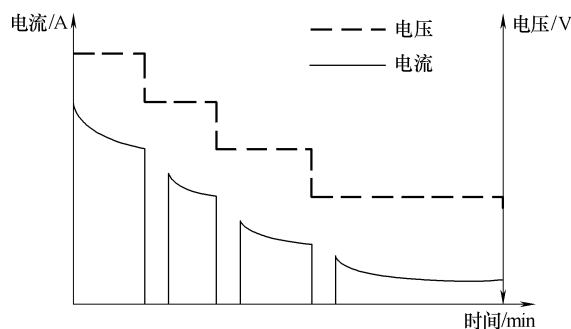


图7-2-9 变电压间歇充电曲线

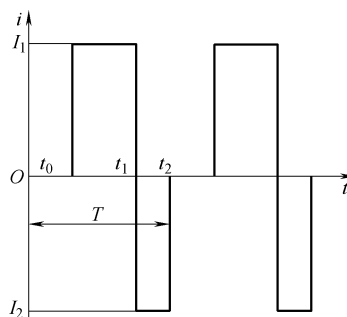


图7-2-10 Reflex TM 快速充电法



5) 变电压、变电流波浪式间歇正负零脉冲快速充电法 (图 7-2-11)。该充电法综合了脉冲充电法、变电流间歇充电法、变电压间歇充电法及 Reflex TM 快速充电法的优点, 其充电电路的控制一般有两种: ①脉冲电流的幅值可变, 而 PWM (驱动充放电开关管) 信号的频率是固定的。②脉冲电流幅值固定不变, PWM 信号的频率可调。该方法采用了一种不同于这两者的控制模式, 脉冲电流幅值和 PWM 信号的频率均固定, PWM 占空比可调, 在此基础上加入间歇停充阶段, 能在较短时间内充进更多电量, 提高锂电池的充电接受能力。

(3) 充电控制策略的选择原则

在充电控制策略上, 成组锂电池与单体锂电池存在较大差异。现多采用电池管理系统与充电机通信的方式实现根据锂电池组中锂电池单体的典型参数进行充电控制。其基本控制思想是在保证锂电池组安全的前提下, 提高锂电池组的可利用能量。锂电池单体参数对保证充电安全极为重要。因此, 充电参数控制策略常采用基于极端单体进行充电参数调整的方法, 即根据不同的锂电池类

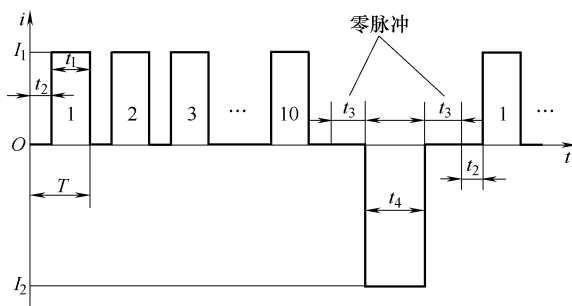


图 7-2-11 波浪式间歇正负零脉冲快速充电

型, 关注锂电池系统中极端单体锂电池的参数。锂电池电动车辆充电常用参数的优先级原则, 由高到低依次为单体最高端电压、单体最高温度、锂电池组端电压、充电电流。针对不同的工况, 需进行总体充电参数调整, 将锂电池组中的极端参数控制在限定范围内。

以锂电池为例, 用限流恒压法进行充电。在充电过程中, 首先检测锂电池组锂电池单体电压, 如发现有锂电池单体超过设定的最高允许电压 (如 4.25V), 则应降低总体充电限制电压, 以控制单体锂电池电压上升。同时, 间隔一定时间检测锂电池温度, 如发现有锂电池单体温度超过锂电池组平均温度 5℃, 则应降低充电限制电流, 限制锂电池温度上升率。

在精细化管理和控制的情况下, 对电压上限的调整还可根据锂电池的充电温度变化进行。若锂电池温度在较低范围, 则提高充电电压上限以提高锂电池组的可充电容量。若锂电池温度在较高范围内, 则降低充电电压上限以保证锂电池安全。

7.2.5 锂电池的模型

建模的意义在于确定锂电池所处环境因素与其特征量之间的数学关系, 考虑的对象包括电动势、端电压、工作电流、温度、内阻、SOC 及 SOH 等, 找到它们之间的联系对电池管理系统的开发具有重要意义。一方面, 通过所建立的锂电池模型可对锂电池在工作中的各种表现进行估计, 从而对各种电池管理策略 (如能量控制策略、电池均衡策略等) 进行仿真。可通过软件法快速检验策略的有效性, 这不仅节约了硬件成本, 还缩短了验证周期, 节约了开发时间。另一方面, 精确的锂电池模型对 SOC 评估算法具有重要意义。建立较为精确的外特性模型, 对寻找 SOC 与各种可直接测量的物理量之间的数值联系极为有利, 进而可通过监测到的外部表现来评估内在的 SOC。

本节所讨论的锂电池模型属于外特性模型。从本质上看, 就是要解决锂电池的伏安特性关系, 即能描述锂电池在工作过程中所表现出的电压与电流之间的关系。这种关系一方面可



利用数值关系表达,另一方面可把锂电池视作一个二端口的网络,而用一个电路网络来反映其伏安关系。从这个意义上说,可通过建立一个等效电路来描述动力电池在工作过程中的伏安关系。这种电路遵循戴维南(Thevenin)定律,因此有时也被称作 Thevenin 模型。以下列举几种具有代表性的等效电路模型。

1) 基于电子运动理论的等效电路模型(图 7-2-12)。根据锂电池内阻和双电层理论,较好地描述了锂电池的特点,但忽略了锂电池在工作过程中两个电极所表现出的不同电位差(两个电极偏离平衡电位的程度不同)。该等效电路不能很好地表现出锂电池的回弹电压特性。

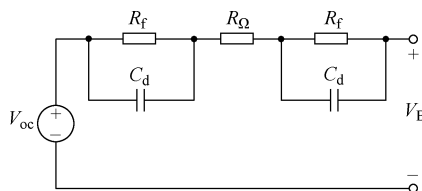


图 7-2-12 基于电子运动理论的电池等效电路

R_f —电池的极化内阻 $R_Ω$ —电池的欧姆电阻 C_d —双电层电容

图 7-2-12 中, R_f 与 C_d 构成的两个 RC 回路代表锂电池的两个电极系统。 $R_Ω$ 代表锂电池本身存在的欧姆电压降。

2) PNGV 等效电路模型(图 7-2-13)。PNGV 模型是《FreedomCAR 电池试验手册》中的标准电池性能模型。该电路模型虽然包括了电极的极化,电池的欧姆电阻等特性,但仍未体现锂电池的电压回弹特性。此外, PNGV 模型中的每个参数都会随锂电池的 SOC 和温度的改变而改变,模型参数的辨识较复杂,不适合实时的 SOC 估算,实用性不强。

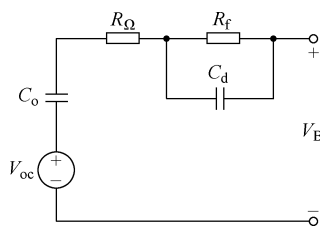


图 7-2-13 PNGV 等效电路模型

R_f —电池的极化内阻 $R_Ω$ —电池的欧姆电阻 C_d —双电层等效电容
 C_o —开路电压随负载电流的时间累计而产生的变化

3) 带有滞回特性的电路模型(图 7-2-14)。该模型在阻容等效电路模型的基础上考虑了锂电池平衡电势,即用 V_b 表示锂电池的滞回电压,并作为锂电池平衡电势的一部分。但对于韦伯阻抗参数值的求解,需要用到锂电池的内阻谱,而内阻谱的测定需要用特定电化学测量法。该测量法所需仪器较难获得,这就对模型的建立造成了一定的影响。另外,该模型尽管考虑了锂电池滞回电压的影响,但没有直接反映出锂电池 SOC,需要分析计算后才能得到。综上所述,现有的几种常用锂电池模型存在以下不足:

- 电压源与 SOC 之间的关系不够明确。
- 有些模型过于简单,不能很好地描述锂电池的动态特性,如电压回弹特性。
- 某些模型未能反映某些锂电池的滞回效应。

因此,在针对锂电池建模前,一定要通过特性测试,充分了解锂电池的特性,并研究模



型参数的确定方法。不能过分强调模型的形式，而应相应地给出一套适于该模型参数估计方法。

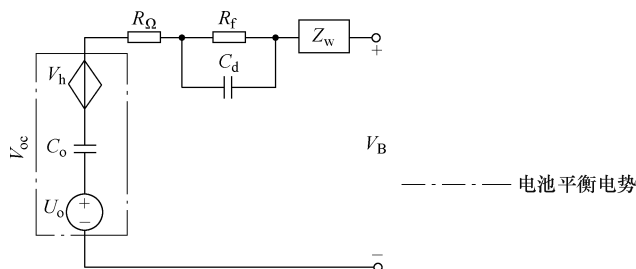


图 7-2-14 带有滞回特性的电路模型

R_Ω —电池的欧姆电阻 R_f —电池的极化内阻 C_d —双电层等效电容 Z_w —韦伯阻抗,表示电池中带电粒子的扩散行为,为容性阻抗,类似表示电池的回弹特性的并联 RC 网络

7.2.6 锂电池的热特性与冷却方法

(1) 热特性

1) 生热机制。锂电池内部产生的热量主要由 4 部分组成: 反应热 Q_r 、极化热 Q_p 、焦耳热 Q_j 和分解热 Q_s 。反应热 Q_r 表示因锂电池内部的化学反应而产生的热量, 这部分热量在充电时为负值, 在放电时为正值。极化热 Q_p 指锂电池在充放电过程中, 负载电流通过电极并伴随有电化学反应时, 电极会发生极化, 锂电池的平均电压会相对开路电压产生偏差, 从而产生热量, 这部分热量在充放电时均为正值。焦耳热 Q_j 是因锂电池内阻产生的。在充放电的过程中, 这部分热量均为正值。其中, 锂电池内阻包括电解质的离子内阻 (含隔膜和电极) 和电子内阻 (包括活性物质、集流体、导电电极耳及活性物质/集流体之间的接触电阻), 符合欧姆特性。分解热 Q_s 表示在锂电池的电极中, 自放电的存在也会导致电极的分解, 从而产生热量。这部分热量在充放电时都很小, 因此可忽略不计。

反应热 Q_r 在充电时为负值, 在放电时为正值, 因此锂电池在放电过程中的热生成率要大于充电过程中的热生成率, 这导致放电时的锂电池温度比充电时高。对于一个完全充满电状态下的锂电池, 它在可逆放电过程中的总反应中呈现了放热效应。更进一步来说, 锂电池的正电极反应表现出较大的放热效应。同时, 负电极反应表现出较小的吸热效应。因此综合正负电极反应热效应, 最终导致了锂电池充放电过程总体呈现放热效应。

对单体锂电池内部而言, 热辐射和热对流的影响很小, 热量的传递主要是由热传导决定的。锂电池自身吸热的量与其材料的比热有关, 比热越大, 吸热越多, 锂电池的温升越小。如果散热量大于或等于产生的热量, 则锂电池温度不会升高。如果散热量小于产生的热量, 则热量会在锂电池内产生积累, 使温度升高。

基于传热学原理, 锂电池传热问题模型可简化为: 在不同边界条件下, 单体锂电池在电化学反应过程中根据工况以不同的生热速率生热。一部分热量经由锂电池外壳传到周围空气中, 传导至空气中的热量与单体锂电池表面传热系数直接相关。另一部分热量导致单体锂电



池自身加热升温。

2) 放电温升特性。图 7-2-15 所示为常温下以 0.3C 倍率电流充满电，再在常温下分别以 0.3C、0.5C 和 1C 倍率放电时，某磷酸铁锂锂电池正极耳处的温升曲线，放电截止电压为 2.5V。

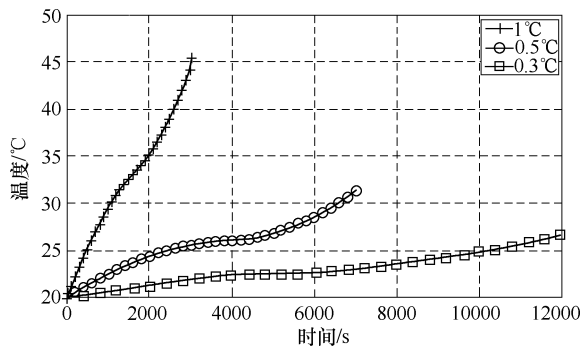


图 7-2-15 不同放电倍率正极柱处的温升曲线

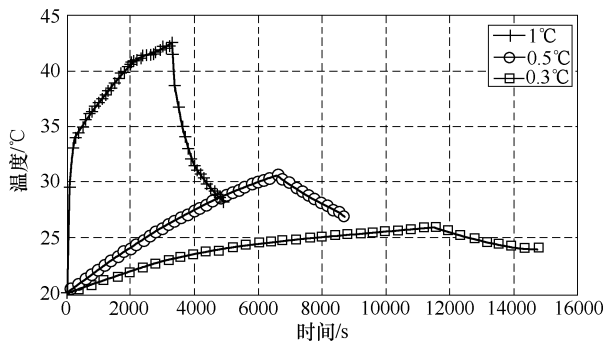


图 7-2-16 不同充电倍率正极柱处的温升曲线

由图 7-2-15 可看出，锂电池放电电流越大，正极耳处的温度上升越快，且温度极值越高。这说明放电电流越大，损耗的热能就越多，降低了放电效率。0.3C 与 1C 倍率放电峰值温度相差 18.9℃，在环境温度不变且没有散热措施的情况下，要减小温度升高的幅度，就必须减少放电电流。因此，如果在环境温度较高，且锂电池大功率放电的情况下，必须采用散热措施，以避免安全问题。

3) 充电温升特性。图 7-2-16 所示为在常温下以 0.3C 倍率电流放电结束后，再在常温下分别以 0.3C、0.5C 和 1C 倍率恒流和 3.8V 恒压，以恒流限压方式充电时，某磷酸铁锂锂电池正极耳处的温升曲线。可以看出，恒流充电开始阶段，锂电池正极柱处温升较快，这主要是因为 SOC 值较小，内阻较大，导致生热速率较大，温升较快。随后，恒流充电后期温升速率放缓，这主要是因为温度和 SOC 值上升后，锂电池内阻值减小，导致生热速率减小，温升放缓。等到恒流充电结束时，锂电池正极柱温度达到峰值。

充电倍率越大，锂电池温度上升越快，且温度峰值也越大。到恒压阶段，随着电流的下



降, 锂电池温度开始下降, 直到电流下降至涓流为止。但充电结束时的温度高于充电前。

4) 温度对锂电池使用性能的影响

① 温度对可用容量比率的影响。正常应用温度范围内, 锂电池温度越高, 工作电压平台越高, 锂电池的可用容量越多。但长期在高温下工作会造成锂电池的容量迅速下降, 从而影响锂电池的使用寿命, 并极有可能造成锂电池热失控。

低温状态锂电池放电效率低, 主要原因如下:

➤ 锂电池电解液的电导率增加, 导致 Li^+ 传输性能差。

➤ 负极表面 SEI 膜是锂离子传递过程中的主要阻力, 表面膜阻抗 R_{SEI} 大于电解液本体阻抗 R_e 。在 -20°C 以下的温度范围内, R_{SEI} 随温度的降低骤增, 与锂电池性能恶化相对应。

➤ 脱嵌 Li^+ 容量不对称性是由 Li^+ 在不同嵌锂态石墨负极中的扩散速度差引起的。低温时, Li^+ 在石墨负极中的扩散速度慢。

➤ 正极与负极表面的电荷传递阻抗增大。

➤ 正极/电解液界面或负极/电解液界面的阻抗增大。

➤ 电极的表面积、孔径、密度, 电极与电解液的润湿性及隔膜等, 均会影响锂电池的低温性能。

② 温度对锂电池内阻的影响。直流内阻是表征动力电池性能和寿命状态的重要指标。锂电池内阻较小, 在许多工况常常忽略不计, 但动力电池处于大电流、深放电工作状态, 内阻引起的压降较大, 此时内阻的影响不能忽略。

锂电池直流内阻一般通过 HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) 试验标定。

HPPC 是美国电动汽车动力电池检测手册 (FreedomCAR Battery Test Manual) 中推荐的复合脉冲功率特性测试工况试验。该试验的主要目的是测试动力电池工作范围 (荷电状态、电压) 内的动态功率特性, 并根据电压响应曲线确定锂电池内阻和 SOC 的对应关系。

试验方法及步骤如下:

- 恒流 0.3C、限压 3.8V 将锂电池充满至额定容量。
- 用 1C 电流放电, 放出额定容量 10% 的电量。
- 静置 1h, 使锂电池在进行脉冲充放电前恢复电化学平衡和热平衡。
- 进行脉冲测试, 先以恒流放电 10s, 停 40s, 再以恒流充电 10s。
- 重复 b ~ d 的步骤, 直到 90% DOD 处再进行最后的脉冲试验。
- 将锂电池放电至 100% DOD。
- 静置 1h。充、放电流的大小取决于锂电池的额定容量。

锂电池直流内阻遵循欧姆定律, 可引起锂电池内部压降, 并生热消耗放电能量。试验表明, 低温状态下整个放电过程中, 直流内阻变化量明显, 而高温状态下变化量则小得多。但是, 放电和充电直流内阻变化的趋势是相同的, 均随温度的升高而降低, 随 SOC 的增大而减小。

(2) 冷却方法

冷却方法的选择对热管理系统的性能有很大影响, 冷却方法要在设计热管理系统前确定。按照方法介质分类, 热管理系统可分为空冷、液冷及相变材料冷却三种形式, 各形式优缺点见表 7-2-3。



表 7-2-3 三种冷却方式的优缺点

冷却方法		优点	缺点
空气冷却		1) 结构简单, 质量相对较小; 2) 没有发生漏液的可能; 3) 有害气体产生时能有效通风; 4) 成本较低	空气与锂电池壁面之间换热系数低, 冷却、加热速度慢
液体冷却	直接接触 (矿物油)	与锂电池壁面之间换热系数高, 冷却、加热速度快, 体积较小	存在漏液可能, 质量相对较大, 维修和保养复杂, 需要水套、换热器等部件, 结构相对复杂
	非直接接触 (水或冷却液)		
相变材料冷却		经济安全, 循环利用效率高	相变材料的应用尚处于试验阶段, 暂未应用于电池热管理系统

液冷方式必须通过水套等换热设施才能对锂电池进行冷却, 这在一定程度上降低了换热效率。锂电池壁面和流体介质之间的换热率与流体流动的形态、流速, 以及流体密度和流体热传导率等因素相关。

相变材料指随温度变化而改变形态并能提供潜热的物质。相变材料由固态变为液态, 或由液态变成固态的过程称为相变过程。相变材料具有在一定温度范围内改变自身物理状态的能力, 既能实现动力设备在比较恶劣的热环境下使锂电池有效降温, 又能满足各锂电池单体间温度分布的均衡性要求, 从而为动力设备提供最佳运行条件, 延长锂电池寿命的同时提高动力设备的动力性能。电池热管理系统所采用的相变材料应具有较大的相变潜热, 以及理想的相变温度, 经济安全, 循环利用效率高。

(3) 测温点的布置与冷却风机的选择

在设计电池热管理系统时, 需要选择的风机种类与功率、温度传感器的数量与测温点的位置要匹配。

以空冷散热方式为例。设计散热系统时, 在保证一定散热效果的情况下, 应尽量减小流动阻力, 降低风机噪声和功率消耗, 提高整个系统的效率。可用试验、理论计算和流体力学 (CFD) 的方法, 通过估计压降、流量来估计风机的功率消耗。流动阻力小时, 可考虑选用轴向流动风扇。流动阻力大时, 离心式风扇比较适合。试验表明, 在环境温度较高的情况下, 动力电池组的流动阻力会增大, 因此在选择冷却风机的压头时, 要留有一定余量。当然, 也要考虑风机占用空间的大小和成本的高低。寻找最优的风机控制策略也是热管理系统的功能之一。

以第 6 章设计的电池箱为例, 电池箱内部流动阻力为 600Pa, 发热量约为 2kW。此时所选风机的压头应高于 600Pa。此外, 流量选择应保证在较高环境温度下, 仍能带走电池箱的热量, 且需留有一定余量。同时, 针对该电源箱的初始方案进行 3C 充放电温升试验, 试验持续 2h, 充放电循环过程中的平均温度、最高温度、最低温度的试验结果如图 7-2-17 所示。可以看出, 电池箱内锂电池组的温度分布极为不均匀, 因此需要知道不同条件下锂电池组热场分布, 以确定危险的温度点。该试验仅测取了 13 个位置的温度情况, 一般测温传感器数量越多, 测温越全面, 但会增加系统成本和复杂性。根据不同的实际工程背景, 理论上利用有限元分析、试验中利用红外热成像或实时的多点温度监控法来分析和测量锂电池组、



锂电池模块和锂电池单体的热场分布, 决定测温点的个数, 找到不同区域合适的测温点。一般的设计应保证温度传感器不被冷却风吹到, 以提高温度测量的准确性和稳定性。在设计锂电池时, 要考虑预留测温传感器空间, 例如可在适当位置设计合适的孔穴。

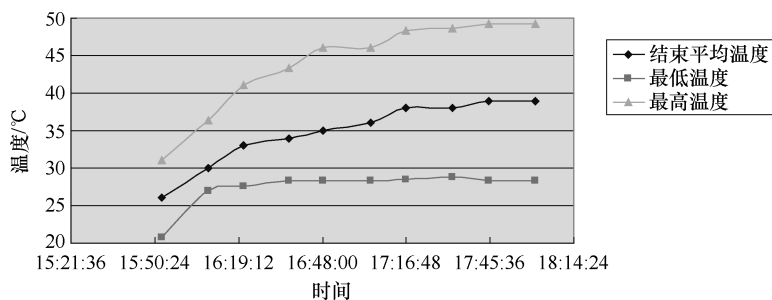


图 7-2-17 电池箱温升试验数据

7.2.7 锂电池的失效机理及失效模式

失效机理理想的锂电池, 除锂离子在正负极之间嵌入和脱出外, 不发生其他副反应, 不出现锂离子的不可逆消耗。实际上, 锂电池中每时每刻都有副反应存在, 也有活性物质不可逆的消耗, 如电解液分解、活性物质溶解、金属锂沉积等, 只是程度不同而已。实际锂电池系统的每次循环中, 任何能产生或消耗锂离子或电子的副反应, 都可能导致锂电池容量平衡的改变。锂电池的容量平衡改变是不可逆的, 并可通过多次循环进行累积, 对锂电池性能产生严重影响。

造成锂电池容量衰减的原因主要如下:

1) 正极材料的溶解。以尖晶石 LiMn_2O_4 为例, Mn 的溶解是引起 LiMn_2O_4 可逆容量衰减的主要原因。Mn 的溶解沉积造成正极活性物质减少。溶解的 Mn 游离到负极时会造成负极 SEI 膜不稳定, 被破坏的 SEI 膜再形成时会消耗锂离子, 造成锂离子减少。Mn 的溶解是尖晶石锂电池容量衰减的重要原因。

2) 正极材料的相变化。锂离子的正常脱嵌反应总是伴随着宿主结构摩尔体积的变化, 引起结构的膨胀与收缩, 导致氧八面体偏离球对称性, 并成为变形的八面体构型。如在 LiMn_2O_4 电池中, J-T 效应所导致的尖晶石结构不可逆转变, 也是容量衰减的主要原因之一。J-T 效应多发生在过放电阶段。在起始材料中加入过量的锂, 掺杂 Ni、Co、Al 等阳离子或 S 等阴离子可有效抑制 J-T 效应。

3) 电解液的分解。锂电池中常用的电解液主要包括由各种有机碳酸酯 (如 PC、EC、DMC、DEC 等) 的混合物组成的溶剂, 以及由锂盐 (如 LiPF_6 、 LiClO_4 、 LiAsF_6 等) 组成的电解质。在充电条件下, 电解液对含碳电极具有不稳定性, 因此会发生还原反应。电解液还原消耗了电解质及其溶剂, 对锂电池容量及循环寿命产生不良影响。

4) 过充电造成的容量损失。锂电池在过充电时, 会造成负极锂的沉积、电解液的氧化以及正极氧的损失。这些副反应或消耗了活性物质, 或产生不溶物质堵塞电极孔隙, 或正极氧损失导致高电压区的 J-T 效应, 这些都会导致锂电池容量衰减。

5) 自放电。锂电池的自放电所导致的容量损失大部分是可逆的, 只有一小部分是不可



逆的。造成不可逆自放电的原因主要有锂离子的损失（形成不可溶的 Li_2CO_3 等物质），电解液氧化产物堵塞电极微孔，造成内阻增大等。

6) 界面膜（SEI）的形成。因界面膜的形成而损失的锂离子会导致两极间容量平衡的改变，在最初的几次循环中就会使锂电池的容量下降。另外，界面膜的形成使部分石墨粒子和整个电极发生隔离而失去活性，也会造成容量损失。

7) 集流体。锂电池中的集流体材料常用铜和铝，两者都容易发生腐蚀，集流体的腐蚀会导致锂电池内阻增加，从而造成容量损失。

研究动力电池系统的失效模式对提高锂电池寿命、电动车辆的安全性和可靠性、降低电动车辆使用成本有至关重要的意义。动力电池系统通常由电芯、电池管理系统、Pack 系统（含功能元器件）、线束、结构件等构成。动力电池系统失效模式，可分为三种不同层级，即电芯失效模式、电池管理系统失效模式、Pack 系统集成失效模式。以下针对动力电池系统（电芯/BMS/Pack）失效模式进行分析并提出相应处理措施。在动力电池系统设计时考虑各种失效模式以提高动力电池安全性。

（1）电芯失效模式

电芯的失效模式又可分为安全性失效模式和非安全性失效模式。电芯安全性失效主要原因如下：

1) 电芯内部正负极短路。电池内短路是由电芯内部引起的。引起锂电池内短路的原因有很多，可能是电芯生产过程中的缺陷导致的，也可能是长期振动使电芯变形导致的。一旦发生严重内短路，便无法阻止控制，外部保险不起作用，肯定会冒烟或燃烧。对于锂电池内部短路问题，目前为止相关厂家没有办法在出厂时将有可能发生内短路的电芯 100% 筛选出来，只能在后期做好检测，以将发生内短路的概率降低。

2) 锂电池单体漏液。这是非常危险，也是常见的失效模式。电动车辆着火事故很多都是锂电池漏液造成的。锂电池漏液的原因包括：外力损伤，碰撞、安装不规范造成密封结构被破坏，焊接缺陷、封合胶量不足造成密封性能不好等。锂电池漏液后，整个电池包的绝缘失效，单点绝缘失效问题不大，如果有两点或以上绝缘失效则会发生外短路。从实际使用情况来看，软包和塑壳电芯相比金属壳单体更容易发生漏液情况导致绝缘失效。

3) 锂电池负极析锂。锂电池使用不当，过充电、低温充电、大电流充电都会导致负极析锂。国内大部分厂家生产的磷酸铁锂或三元锂电池在 0°C 以下充电都会发生析锂， 0°C 以上根据电芯特性只能小电流充电。发生负极析锂后，锂金属不可还原，导致锂电池容量不可逆衰减。析锂达到一定程度，会形成锂枝晶，刺穿隔膜发生内短路。因此动力电池在使用时应严禁低温下充电。

4) 电芯胀气鼓胀。产生胀气的原因很多，主要是锂电池内部发生副反应产生气体，最典型的是与水发生副反应。胀气问题可通过在电芯生产过程中严格控制水分来避免。胀气会导致漏液等情况。

以上失效模式是非常严重的问题，可能造成人员伤亡。一个电芯使用 1~2 年没问题，并不代表它以后没问题，使用越久的锂电池失效的风险越高。

电芯的非安全性失效只会影响使用性能，主要有以下几点：

1) 容量一致性差。动力电池的不一致性通常指一组锂电池内，单体锂电池的剩余容量差异过大、电压差异过大，引起锂电池续航能力变差。引起锂电池间一致性变差的原因是多



方面的,包括锂电池的生产制造工艺,存放时间,充放电期间的温度差异,充放电电流强度等。目前,解决方法主要是提高锂电池的生产制造工艺控制水平,从生产环节尽可能保证锂电池的一致性,使用同一批次锂电池进行配组。这种方法有一定效果,但无法根治差异性问题的,锂电池组使用一段时间后一致性差的问题还会出现。锂电池组发生不一致性问题后,如果不能及时处理,则问题会愈发严重,甚至发生危险。

2) 自放电过大。制造锂电池时,杂质造成的微短路引起的不可逆反应是造成个别锂电池自放电偏大的最主要原因。自放电微小时可忽略。在长时间的充放电及搁置过程中,锂电池会随环境条件发生化学反应,产生自放电现象,这会使锂电池电量降低,性能下降,不能满足使用需求。

3) 低温放电容量减少。随着温度的降低,电解液性能变差,参与反应不够,电导率降低导致内阻增大,电压平台降低,容量也降低。目前,锂电池 -20°C 下的放电容量基本为额定容量的70%~75%。低温下锂电池放电容量减少,且放电性能差,影响电动汽车的使用性能和续航里程。

4) 锂电池容量衰减。锂电池容量衰减主要源自活性锂离子损失以及电极活性材料损失。正极活性材料层状结构规整度下降,负极活性材料上沉积钝化膜,石墨化程度降低,隔膜孔隙率下降,导致锂电池电荷传递阻抗增大,脱嵌锂能力下降,从而导致容量损失。锂电池容量衰减是不可避免的问题。但是,目前电池厂家应首先解决安全性失效问题和电池一致性问题,在此基础上再考虑延长锂电池的循环寿命。

(2) BMS 失效模式

锂电池单体失效不仅和其本身有关,也和电池管理系统 BMS 失效有关。BMS 失效模式可能造成的严重事故如下:

1) BMS 电压检测失效导致锂电池过充电或过放电。连接、压线过程或接触不良导致电压检测线失效,BMS 没有电压信息,充电未正常停止。锂电池过充会着火、爆炸,磷酸铁锂电池过充至5V以上大部分只是冒烟,但是三元锂电池一旦过充,就会发生爆炸。此外,过充电容易导致锂电池中的电解液分解释放出气体,从而导致锂电池鼓胀,严重时甚至会冒烟起火。锂电池过放电会导致其正极材料分子结构损坏,进而导致充不进电。同时,锂电池电压过低造成电解液分解,干涸发生析锂,回到锂电池内会造成短路。在系统设计时应选用可靠的电压采集线,在生产过程中严格管控,杜绝电压采集线的失效问题。

2) BMS 电流检测失效。霍尔传感器失效,BMS 采集不到电流,SOC 无法计算,偏差大。电流检测失效可能导致充电电流过大。充电电流大,则电芯内部发热量大,温度超过一定值时,会使隔膜固化容量衰减,严重影响锂电池寿命。

3) BMS 温度检测失效。温度检测失效导致锂电池工作温度过高,发生不可逆反应,这对锂电池容量、内阻有很大影响。电芯日历寿命与温度直接相关, 45°C 时的循环次数是 25°C 时的一半。另外,温度过高使锂电池易发生鼓胀、漏液、爆炸等问题,因此使用过程中要严格控制,使锂电池温度在 $20\sim 45^{\circ}\text{C}$ 之间。这样除能有效提高锂电池的使用寿命和可靠性外,还能有效避免锂电池低温充电析锂造成的短路及高温热失控。

4) 绝缘监测失效。动力电池系统变形或漏液都会引发绝缘失效,如果 BMS 没有检测出来,则有可能发生人员触电事故。因此 BMS 系统对监测传感器的要求应该是最高的,避免监测系统失效可极大地提高动力电池的安全性。



5) 电磁兼容问题通信失效。对 BMS 系统来说,电磁兼容主要考核其抗电磁干扰能力。电磁干扰会导致 BMS 通信失效,引发上述问题。

6) SOC 估算偏差大。目前所有 BMS 系统普遍存在这一问题,只是偏差控制上有一定差别。目前的检验标准要求 SOC 估算偏差在 5% 以内,但受实际使用环境影响, SOC 偏差会越来越大。

(3) Pack 系统集成失效模式

1) 汇流排的失效。如果采用螺栓连接,在后期使用过程中,螺栓氧化脱落或振动导致螺栓松旷都会使导体连接处大量生热,极端情况下会导致动力电池着火。因此绝大部分动力电池系统生产厂家在 Pack 设计时,都在电芯与电芯连接或模块与模块连接处采用激光焊接,或在连接处增加温度传感器,通过检测手段避免汇流排失效。

2) 动力电池系统主回路连接器失效。动力电池系统高压线通过连接器与外部高压系统相连。连接器性能不可靠,在振动下发生虚接,会产生高温导致连接器烧蚀。一般来说,连接器温度超过 90℃ 就会发生连接失效。因此在系统设计时,连接器需要增加高压互锁功能,或在连接器附近加装温度传感器,时刻监测连接器的温度,防止连接器失效。

3) 高压接触器粘连。接触器有一定次数的带载断开,大部分接触器会在大电流带载闭合时烧蚀。系统设计时一般采用双继电器方案,按照先后顺序闭合控制以避免高压接触器粘连。

4) 熔断器过流保护失效。高压系统部件中的熔断器在选型匹配时,要综合考虑梯度熔断问题。振动或外部受到碰撞挤压会导致动力电池发生形变、密封失效、IP 等级降低,因此在系统设计时需要考率电池箱结构的碰撞防护功能。

7.2.8 锂电池使用安全性的影响因素

在热冲击、过充、过放和短路等滥用情况下,锂电池内部的活性物质及电解液等组分间会发生化学、电化学反应,产生大量热量与气体,使内部压力升高,积累到一定程度可能导致着火,甚至爆炸。其主要原因如下:

1) 材料热稳定性。锂电池在一定滥用情况下,如高温、过充、针刺穿透及挤压等,会导致电极和有机电解液之间的强烈作用,如有机电解液的剧烈氧化、还原,或正极分解产生的氧气进一步与有机电解液反应等,这些反应产生的大量热量若不能及时散失到周围环境中,则必将导致锂电池内热失控,最终导致锂电池燃烧、爆炸等事故。因此正负电极、有机电解液相互作用的热稳定性,是制约锂电池安全性的首要因素。

2) 制造工艺。锂电池的制造工艺分为液态和聚合物锂电池的制造工艺。如正极和负极混料、涂布、辊压、裁片或冲切、组装、加注电解液的量、封口、化成等工序的质量控制,无一不影响着锂电池的性能和安全性。浆料的均匀度决定了活性材料在电极上分布的均匀性,从而影响锂电池的安全性。浆料细度太大,锂电池充放电时会出现负极材料膨胀与收缩比较大问题,可能析出金属锂。浆料细度太小,会导致锂电池内阻过大。涂布加热温度过低或烘干时间不足会使溶剂残留,粘结剂部分溶解,使部分活性物质容易剥离。温度过高可能造成粘结剂炭化,活性物质脱落形成锂电池内短路。

提高锂电池使用安全性的措施如下:

1) 使用安全型锂电池电解质。阻燃电解液是一种功能电解液,其阻燃功能通常是通过



在常规电解液中加入阻燃添加剂获得的。使用阻燃电解液是目前解决锂电池安全性问题最经济有效的措施。

使用固体电解质代替有机液态电解质，能有效提高锂电池的安全性。固体电解质包括聚合物固体电解质和无机固体电解质。聚合物电解质，尤其是凝胶型聚合物电解质的研究近年来取得很大进展，目前已成功用于商品化锂电池。干态聚合物电解质不像凝胶型聚合物电解质那样包含液态易燃的有机增塑剂，因此它在防漏液、耐蒸汽压和阻燃等方面具有更好的性能。无机固体电解质具有更好的安全性，不挥发、不燃烧，不存在漏液问题，同时机械强度高，耐热温度明显高于液体电解质和有机聚合物，使锂电池的工作温度范围得以扩大。将无机材料制成薄膜，更易实现锂电池的小型化，且这类锂电池具有超长的储存寿命，能大大拓展现有锂电池的应用领域。

2) 提高电极材料热稳定性。负极材料热稳定性是由材料结构和充电负极的活性决定的。对于碳材料，球形碳材料〔如中间相碳微球 (MCMB)〕相对于鳞片状石墨有较低的比表面积和较高的充放电平台电压，因此充电态活性较低，热稳定性相对较好，安全性高。具有尖晶石结构的 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ，相对于层状石墨结构稳定性更好，充放电平台也高得多，因此热稳定性更好，安全性更高。目前，对安全性要求较高的动力电池中通常使用 MCMB 或 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 代替普通石墨作为负极。对于负极材料，特别是石墨，其与电解液界面的固体电解质界面膜 (SEI) 的热稳定性更加重要，因为这通常被认为是热失控发生的第一步。提高 SEI 膜的热稳定性途径主要有两种：

➤ 负极材料的表面包覆，如在石墨表面包覆无定形碳或金属层。

➤ 在电解液中添加成膜添加剂。在锂电池活化过程中，成膜添加剂在电极材料表面形成稳定性较高的 SEI 膜，有利于获得更好的热稳定性。

正极材料和电解液的热反应被认为是热失控发生的主要原因，提高正极材料的热稳定性尤为重要。与负极材料一样，正极材料的本质特征决定了其安全特征。 LiFePO_4 具有聚阴离子结构，其中的氧原子非常稳定，受热不易释放，因此不会引起电解液的剧烈反应或燃烧。在过渡金属氧化物中， LiMn_2O_4 在充电态下热稳定性较好，因此这种正极材料的相对安全性也较好。此外，也可通过体相掺杂、表面处理等手段提高正极材料的热稳定性。

7.2.9 磷酸铁锂电池的外特性

磷酸铁锂电池的外特性主要包括电动势特性及超电势特性。

1) 磷酸铁锂电池的电动势特性 EMF (Electro-Motive Force) 指电池的平衡电势，即电池体系处于平衡状态时正负极的电势差，它是电池体系中客观存在的一个物理量。由于 EMF 是磷酸铁锂电池平衡时的电势，要想直接获得 EMF 值，必须在磷酸铁锂电池处于平衡状态时测量其端电压。因此，一般采取的方法是间歇充/放电，即将磷酸铁锂电池充/放电一定时间，再静置足够长时间后测量其开路电压，并认为此时的开路电压值为磷酸铁锂电池的 EMF 值。根据磷酸铁锂电池的特性，其静置时间约为 8h，此时磷酸铁锂电池基本处于稳定状态。然而，通过此方法获得的平衡电势曲线，其充电与放电曲线之间会存在差异。

图 7-2-18 所示为通过实验获得的磷酸铁锂电池的充电与放电时的平衡电势曲线。该图表明，磷酸铁锂电池存在滞回电压现象（因为磷酸铁锂电池的充放电曲线形态类似磁导体的磁滞回性曲线），滞回电压的产生是由磷酸铁锂电池本身的电化学特性造成的。该现象广



泛存在于磷酸铁锂电池、镍氢电池及其他类型锂电池中。

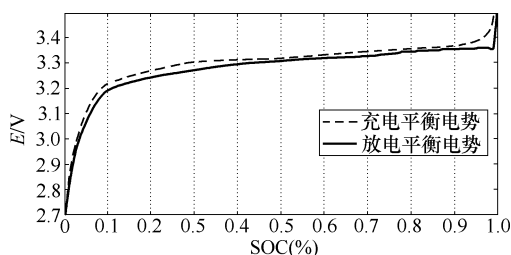


图 7-2-18 磷酸铁锂电池充电与放电时的平衡电势曲线

2) 磷酸铁锂电池的超电势特性。当磷酸铁锂电池发生电极反应时, 电极电势会偏离平衡电势, 偏离平衡电势的值即超电势。磷酸铁锂电池偏离平衡状态时的外特性表现为等效阻抗与回弹电压。

① 磷酸铁锂电池的等效阻抗特性。磷酸铁锂电池在充放电时, 放出的能量总会比充进的能量少。磷酸铁锂电池在充放电循环时, 会有能量损耗, 且用损耗的能量计算出的等效阻抗的值基本接近。因此, 可认为磷酸铁锂电池的内部存在一个等效电阻, 磷酸铁锂电池充放电时它会消耗一定的能量。

在磷酸铁锂电池工作过程中, 由于其组成材料和极化等原因, 电流通过磷酸铁锂电池时会产生一定的电压降, 这种现象对外表现为磷酸铁锂电池的等效内阻。磷酸铁锂电池内阻主要由欧姆电阻和极化电阻组成。其中, 欧姆电阻是电池体系结构特征及组成磷酸铁锂电池的材料等原因影响下产生的电阻, 它包括电极、电解质溶液、隔膜等与各部分零部件之间的接触电阻、电极表面氧化膜产生的电阻及隔膜电阻, 各零部件之间的接触电阻、隔膜电阻与电解质的电阻可看作常数。在磷酸铁锂电池不工作时, 流过电极的电流为零, 电极上的氧化反应速率和还原反应速率相等, 净反应速率为零, 电池体系处于动态平衡中。当有电流流过电极时, 电池体系不再处于平衡状态, 电极的净反应速率也不再为零, 电极的电位也会偏离原来平衡时的电位, 这种现象即电极的极化。造成电极极化的原因比较复杂。电极极化发生在电极/溶液界面, 包括一系列吸附、脱嵌、电荷转移、电化学反应等步骤。这些步骤在电极反应中都是串联完成的, 当某个步骤速率最慢, 即所受阻最大时, 整个电极极化过程便由该步骤控制。根据控制步骤的不同, 电极极化可分为电化学极化、浓差极化及电阻极化。

综合磷酸铁锂电池内阻的电化学机理及实验测得的外特性曲线, 对于一定的电池体系, 其极化内阻主要受温度、老化程度的影响, 在一定的温度范围和循环寿命内, 其值可认为基本不变。

② 磷酸铁锂电池的回弹电压特性。可通过测量磷酸铁锂电池由工作状态变为静置后的开路电压来获得。图 7-2-19 所示为在 20℃ 环境下, 同一放电倍率、不同 SOC 值处静置后的磷酸铁锂电池开路电压变化曲线。图中不同 SOC 对应的电压大小不同, 主要是受不同 SOC-EMF 关系影响所致。

电解液是磷酸铁锂电池的重要组成部分之一。水的理论分解电压为 1.23V, 以水为溶剂的电解液构成的蓄电池中, 最高的电池电压也只有 2V 左右 (如铅酸电池)。然而, 磷酸铁

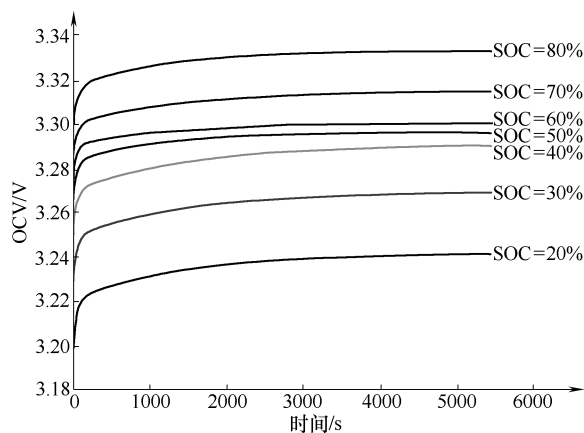


图 7-2-19 同一放电倍率、不同截止 SOC，放电后静置一段时间的电压曲线

锂电池的电压为 3~4V，以水为溶剂的电解液不再适用，因此磷酸铁锂电池的电解液必须采用非水溶剂的电解液。

电解液的电导率主要与溶剂的介电常数和黏度有关。介电常数越高，自由锂离子数越多，电解液的电导率越高。黏度越低，离子的移动速度越快，电解液的电导率相应也越高。水的介电常数远高于其他常见非水溶剂，这就导致磷酸铁锂电池的电解液电导率只有以水为溶剂的电解液（如铅酸电池、碱性电池的电解液）的电导率的几百分之一。较低的电导率使磷酸铁锂电池在以较大电流放电时，来不及从电解液中补充与电流相当的锂离子，这就会产生电压降。当磷酸铁锂电池停止放电，流过磷酸铁锂电池的电流为零时，来不及补充的锂离子会经过扩散和相位转变两个阶段，使电池体系重回平衡状态，对外表现为磷酸铁锂电池的开路电压先急剧上升后缓慢上升，直至上升到平衡时的电压，即磷酸铁锂电池的电动势，这种现象就是磷酸铁锂电池的电压回弹特性。

综上所述，磷酸铁锂电池的超电势既有阻性又有容性，因此可用阻容网络来实现磷酸铁锂电池的超电势特性。

7.2.10 动力电池使用寿命的影响因素

当动力电池单体寿命一定时，动力电池的连接方式、组内单体的块数及其不一致程度便成为影响动力电池组寿命的最主要因素。

(1) 动力电池单体寿命影响因素

动力电池单体在充放电循环使用过程中，由于一些不可避免的副反应，其可用活性物质会逐渐减少，性能会逐渐退化。其退化程度随充放电循环次数的增加而加剧，其退化速度与动力电池单体充放电的工作状态和环境有直接联系。

影响动力电池单体寿命的因素主要包括充放电速率、充放电深度、环境温度、存储条件、维护过程、电流波纹及过充电量和过充频度等。

1) 充电截止电压。动力电池在充电过程中一般都伴随有副反应。提高充电截止电压，甚至超过动力电池电化学电位后进行充电，都可能加剧副反应，并可能导致动力电池使用寿



命缩短,内部短路,甚至着火爆炸等。

2) 放电深度。深度放电会加速动力电池容量的衰减。浅充浅放可有效提高动力电池的使用寿命。

3) 充放电倍率。动力电池单体的充放电倍率是其在使用工况下最直接的外界环境特征参数,其大小直接影响动力电池单体的容量衰减速度。充放电倍率越高,动力电池单体的容量衰减越快。动力电池单体大倍率的充放电均会加快其容量的衰减速度。如果充放电倍率过大,则动力电池单体还可能出现直接损坏,甚至过热、短路起火等极端现象。

4) 环境温度。不同的动力电池均有最佳的工作温度范围,过高或过低的温度都会对其使用寿命产生影响。试验表明,高温下运行的动力电池的容量衰减程度明显大于常温下运行的动力电池。

5) 存储条件。在存储过程中,受自放电、正负极材料钝化、电解液分解蒸发、电化学反应等因素影响,动力电池会产生不可逆的容量损失。以锂电池为例,存储期间,其石墨负极的副反应是引起容量衰减的主要原因。锂电池电极材料与电解液在固液相界面上发生反应后,其负极表面会形成一层电子绝缘且离子可导的固体电解质界面膜。其主要是因电解液在负极表面的还原分解形成的。这层膜的性质和质量直接影响电极的充放电性能和安全性。

(2) 动力电池组寿命的影响因素

动力电池组寿命的影响因素除单体动力电池本身所涉因素外,还包括不一致性、成组方式、温区差异和振动环境等。

在电动车辆上应用时,不一致性对动力电池组寿命的影响有3个方面:

1) 电动车辆行驶距离相同,因容量不同,动力电池的放电深度也不同。在大多数动力电池还处于浅放电的情况下,容量不足的动力电池已进入深放电阶段。而其他动力电池深放电时,低容量动力电池可能已没有电量,成为电路中的负载。即容量不一致导致的放电深度差异。

2) 同一种动力电池都有相同的最佳放电率,容量不同,最佳放电电流就不同。在串联组中,电流相同,因此有的动力电池在最佳放电电流工作,而有的动力电池达不到或超过了最佳放电电流。即不一致性导致了工作过程中的放电率差异。

3) 在充电过程中,小容量动力电池会提前充满,为使动力电池组中其他动力电池充满,小容量动力电池必然过充电,充电后期充电电压偏高,甚至超出充电电压最高限,形成安全隐患,影响整个动力电池组的充电过程。过充电会严重影响动力电池的使用寿命。

在电动车辆上,动力电池组可能根据需要布置在不同位置,动力电池所处的热环境存在差异,如部分动力电池可能靠近电机等热源,而部分动力电池可能处于通风状况良好的区域。同组动力电池内,由于通风条件的差异,也会导致动力电池单体间的温差。应采用较好的冷却措施,避免动力电池在同种工况下以不同特性工作。

此外,电动车辆的振动环境会对动力电池的机械特性产生影响,如极耳断裂、电解液泄漏、电气连接件松动、活性物质脱落等,进而对动力电池及动力电池组的寿命和使用性能产生负面影响。



7.3 动力电池管理系统

蓄电池应用于小型消费电子产品（如手机）中时，以单体的形式存在，而在电动自行车、电动摩托车、纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车中应用时，要求容量更大，因此需要通过串联、并联的方式组成蓄电池组进行充放电。单体蓄电池之间的性能差异，决定了其作为动力和储能电池时，需要有电池管理系统进行充放电管理、监控和保护，以避免单体蓄电池出现损坏或不一致性，影响整个蓄电池组的性能。

动力电池管理系统（Battery Management System, BMS）是对动力电池组进行安全监控及有效管理，提高动力电池使用效率的装置。其作用如下：

- 实现对动力电池状态（动力电池的温度、单体动力电池电压、工作电流、动力电池和电池箱之间的绝缘）的在线监测。

- SOC 估算。

- 状态分析（SOC 是否过高、动力电池温度是否过高/低、单体动力电池电压是否超高/低、动力电池的温升是否过快、绝缘是否故障、是否过电流、动力电池的一致性分析、动力电池组是否存在故障以及是否通信故障等）。

- 动力电池箱的热管理。

对电动车辆而言，通过动力电池管理系统对动力电池组充放电进行有效控制，可达到增加续驶里程，延长使用寿命，降低运行成本的目的，并保证动力电池组工作的安全可靠。

7.3.1 动力电池管理系统的基本构成和功能

动力电池管理系统是集监测、控制与管理为一体的复杂的电气测控系统，也是电动车辆商品化、实用化的关键。电动车辆运行时，其动力电池的放电和充电均为脉冲工作模式，大的电流脉冲很可能会造成动力电池过充（超过 80% SOC）、深放（小于 20% SOC），甚至过放（小于 0% SOC），因此电动车辆的控制系统一定要对动力电池的 SOC 敏感，并能及时做出准确的调整，这样动力电池管理系统才能根据动力电池容量决定其充放电电流，从而实施有效控制，根据各动力电池单体容量的不同，识别动力电池组中各动力电池间的性能差异，并据此做出均衡充电控制和动力电池是否损坏的判断，确保动力电池组的整体性能良好，延长动力电池组的寿命。

准确和可靠地获得动力电池 SOC 是动力电池管理系统最基本和首要的任务，在此基础上才能对电动车辆的用电进行管理，特别是防止动力电池的过充及过放。动力电池的 SOC 是不能直接得到的，只能通过对电压、电流、内阻、温度等动力电池特性参数进行分析来推断。这些参数与 SOC 的关系为复杂的非线性关系。

动力电池管理系统的主要工作原理可简单归纳为：数据采集电路采集动力电池状态信息数据后，由电子控制单元（ECU）进行数据处理和分析，然后动力电池管理系统根据分析结果向系统内的相关功能模块发出控制指令，并向外界传递参数信息。

动力电池管理系统功能主要包括数据采集、动力电池状态计算、能量管理、安全管理、热管理、均衡控制、通信和人机接口。图 7-3-1 所示为动力电池管理系统功能。

1) 数据采集。动力电池管理系统的所有算法都是以采集的动力电池数据作为输入的。采样速率、精度和前置滤波特性是影响动力电池系统性能的重要指标。电动车辆动力电池管

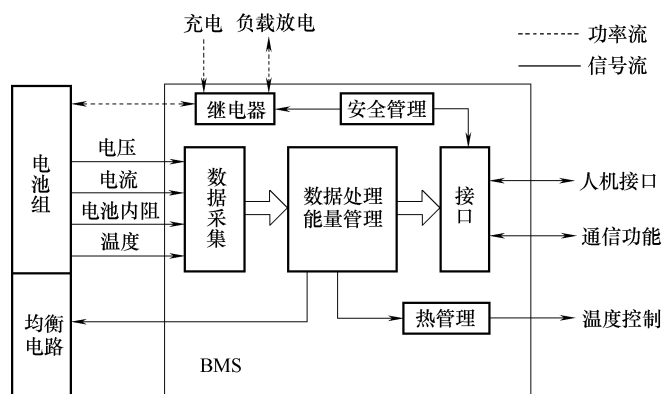


图 7-3-1 某电动车辆动力电池管理系统的基本功能框图

理系统的采样速率一般要求大于 200Hz (50ms)。

2) 动力电池状态计算。动力电池状态计算包括动力电池组 SOC 和动力电池组健康状态 (SOH) 两方面。SOC 用来提示动力电池组剩余电量, 是计算和估计电动车辆续驶里程的基础。SOH 用来提示动力电池技术状态、预计可用寿命等健康状态的参数。

3) 能量管理。能量管理主要包括以电流、电压、温度、SOC 和 SOH 为输入进行充电过程的控制, 以 SOC、SOH 和温度等参数为条件进行放电功率的控制两部分。

4) 安全管理。监测动力电池电压、电流、温度是否超过正常范围, 防止动力电池组过充过放。现在对动力电池组进行整组监控的同时, 多数动力电池管理系统已经可以对极端单体动力电池进行过充、过放、过温等安全状态管理。

5) 热管理。通过风扇等冷却系统和加热装置使动力电池温度处于正常范围内。在动力电池工作温度过高时进行冷却, 工作温度过低时进行加热, 并在动力电池工作过程中保持动力电池单体间的温度均衡。热管理在大功率放电和高温条件下使用时尤为重要。

6) 故障诊断与报警。当动力电池电量或能量过低需要充电时, 及时报警, 防止动力电池过放电而影响使用寿命。当动力电池组的温度过高, 非正常工作时, 及时报警, 以保证动力电池正常工作。

7) 均衡控制。动力电池的一致性差异导致动力电池组的工作状态是由最差动力电池单体决定的, 当动力电池单体之间有差异时, 应有一定措施进行补偿。在动力电池组各动力电池单体之间设置均衡电路, 实施均衡控制, 以保证各单体动力电池充放电的工作情况基本一致, 提高整体动力电池组的工作性能。

8) 通信功能。通过总线实现动力电池参数和信息与车载设备或非车载设备的通信, 为充放电控制、整车控制提供数据依据, 是动力电池管理系统的重要功能之一。根据应用需要, 数据交换可采用不同的通信接口, 如模拟信号、PWM 信号、CAN 总线或 I2C 串行接口。

9) 人机接口。根据设计的需要设置显示信息及控制按键、旋钮等。

某电动车辆动力电池管理系统的基本功能如图 7-3-2 所示。

表 7-3-1 所示为动力电池管理系统的基本功能及描述。

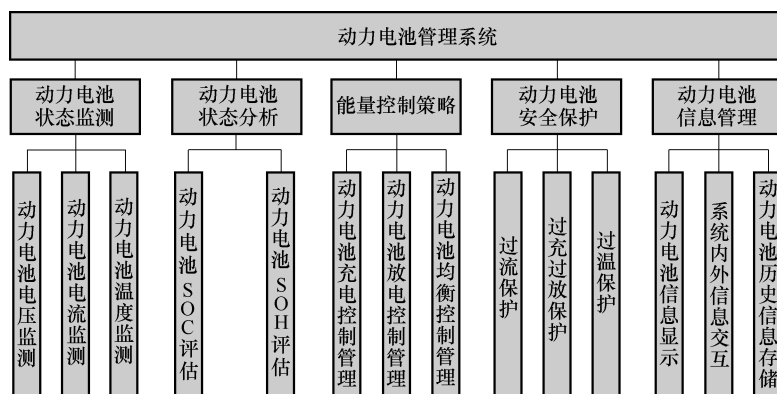


图 7-3-2 某电动车辆动力电池管理系统的基本功能

表 7-3-1 动力电池管理系统的基本功能及描述

基本功能		功能描述	备注
动力电池状态监测	动力电池电压监测	监测动力电池电压	
	动力电池电流监测	监测动力电池电流	
	动力电池温度监测	监测动力电池温度及动力电池箱环境温度	对动力电池 SOC 评估、安全保护等方面具有非常重要的意义
动力电池状态分析	动力电池 SOC 评估	评估动力电池剩余电量	可用百分比表示，也可换算为等效时间或等效里程来表示
	动力电池 SOH 评估	评估动力电池老化状态	可用百分比表示。SOH 受动力电池使用过程中的工作温度、充放电电流大小等因素影响，需要在使用过程中不断进行评估和更新
能量控制策略	动力电池充电控制管理	指动力电池管理系统在动力电池充电过程中对充电电压、充电电流等参数进行实时的优化控制	优化的目标包括充电时长、充电效率及充电的饱满程度等
	动力电池放电控制管理	指在动力电池放电过程中根据动力电池状态对放电电流大小进行控制	在动力电池组 SOC 小于 10% 的状态下，适当限制动力电池组的最大放电电流，有利于延长车辆的续驶里程和动力电池组的使用寿命
	动力电池均衡控制管理	指采取一定措施尽可能降低动力电池不一致性的负面影响，以优化动力电池组整体放电效能，延长动力电池组整体寿命	动力电池组中只要有一个动力电池单体的电压低于放电的限值，就要对整个动力电池组进行保护。因此，对动力电池进行均衡管理有利于把剩余电荷利用起来，从而提高动力电池组的放电效能
动力电池安全保护	过流保护	指在充放电过程中，如果工作电流超过安全值，则应采取相应的安全保护措施	能量型磷酸铁锂电池一般都支持 0.3 ~ 0.5C 倍率持续充放电。动力型磷酸铁锂电池一般都支持 1C 倍率持续充放电



(续)

基本功能		功能描述	备注
动力电池 安全 保护	过充、过放保护	过充保护指在动力电池 SOC 很高的情况下，切断动力电池充电回路。过放保护指在动力电池 SOC 很低的情况下，切断动力电池放电回路	过充、过放保护有一种简单的实现方式，即设定充、放电的截止保护电压，如果检测到的动力电池电压高于或低于所设定的门限电压值，则及时切断电流回路以保护动力电池
	过温保护	指当温度超过一定限值时对动力电池采取保护性措施	过温保护需考虑环境温度，动力电池组的温度以及每个单体动力电池本身的温度。由于温度控制往往具有滞后性，温度保护要考虑提前量
动力电池 信息 管理	动力电池信息显示	通过仪表显示动力电池状态信息	动力电池状态信息一般包括以下三类： 1) 实时电压、电流、温度信息：一般为整个动力电池组的总电压、总电流、最高动力电池电压、最低动力电池电压、最高动力电池温度、最低动力电池温度等信息 2) 动力电池剩余电量信息：为驾驶人提供直观的驾驶感受和判断依据 3) 告警信息：当动力电池组存在安全问题或即将发生安全问题时，需要及时通过仪表盘通知驾驶人
	系统内外信息交互	动力电池管理系统同时具有内网和外网两级网络。内网用于传递动力电池管理系统的内部信息。外网用于动力电池管理系统与整车控制器、电机控制器等其他部件交互信息	外网应是双工（支持双向通信）的。一方面，动力电池管理系统需要将电压、电流、温度等信息发送给其他部件。另一方面，整车控制器也需要将“是否有充电机接入”“是否允许进行充电”等信息发送给动力电池管理系统
	动力电池历史信息存储	信息存储从时效上具有两种方式，即临时存储与永久存储。临时存储是利用 RAM，暂时保存动力电池信息。永久存储可利用 EEROM、Flash Memory 等器件来实现，可保存时间跨度较大的历史信息	具有以下意义： 1) 数据缓冲，提高分析估算的精度。由于存在干扰，实时监测到的电压、电流数值存在错误，有助于利用历史数据对错误数据进行滤波 2) 有助于动力电池状态分析。特别是能根据动力电池工作的历史数据，对动力电池的老化状态等进行评估 3) 有助于故障分析与排除。动力电池历史信息存储功能类似于飞机的黑匣子，可通过对历史数据的分析发现故障原因和排除故障

注：1. 大多数磷酸铁锂动力电池都支持短时间的过载放电，能在车辆起步、提速过程中提供较大的电流以满足动力性能的要求。但不同厂家、不同型号的动力电池所支持的过载电流倍率、过载持续时间都是不一致的。例如某型号动力电池支持不超过 1min 的 5C 过载电流，这正是动力电池管理系统的过流保护功能所必须考虑的。

2. 制动能量回收也是能量控制管理的重要内容之一。例如在某些混合动力汽车中，需要通过充放电控制管理将动力电池的 SOC 维持在 60%~80%，以腾出足够的电荷容量空间接收制动回收的能量。这样做的另外一个考虑就是使动力电池工作在等效内阻较小的区间，从而使充放电的效率更高。

3. 根据用户需求和车辆设计要求，设计者还可加入单独“热管理与控制”“通信失效识别”“故障诊断与处理”“漏电检测与防护”等功能，提升动力电池箱的安全可靠性。



7.3.2 动力电池管理系统的设计

动力电池管理系统的硬件电路通常可分为2个功能模块，即动力电池监测回路（Battery Monitoring Circuit，简称BMC）和动力电池组控制单元（Battery Control Unit，简称BCU）。

（1）BMC与各单元电池之间的拓扑关系

BMC与各单元电池之间的拓扑关系包括1个BMC对应1个单元电池（图7-3-3a）和1个BMC对应多个单元电池（图7-3-3b）两种。

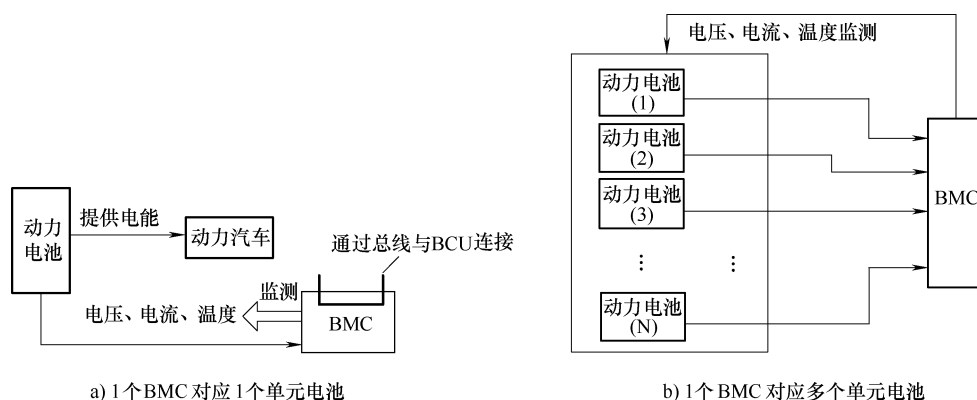


图 7-3-3 BMC 与各单元电池之间的 2 种拓扑关系

2 种拓扑关系的优劣对比见表 7-3-2。

表 7-3-2 2 种拓扑关系的优劣对比

BMC 与单元电池间的拓扑关系	优 点	缺 点
1 个 BMC 对应 1 个单元电池	BMC 与单元电池的距离较短，可减少采集线路的长度及复杂度，采集精度高，抗干扰性好	电路板的相对成本较高；动力电池管理系统的工作电源由动力电池提供，因此可能使整个动力电池管理系统的能耗相对更大
1 个 BMC 对应多个单元电池	由于电路板由多个动力电池共享，平均成本较低	由于采集线路较长，连线的复杂度较高，抗干扰性相对较差，可能降低电压采集精度

（2）BCU 与 BMC 之间的拓扑关系

BCU 与 BMC 之间的拓扑关系有以下三种：

1) BCU 与 BMC 共板。对于动力电池个数较少的情况，动力电池管理系统的规模较小，BCU 与 BMC 可设计在同一块电路板上，对车上的所有动力电池进行统一管理。在某种特殊情况下，BCU 和 BMC 的功能甚至可合并到同一块集成电路芯片中完成。采用这种拓扑结构的动力电池管理系统成本较低，但不适用于动力电池数量较多、规模较大的电动车辆应用场合。

2) 星型连接方式（图 7-3-4）。相对于 BCU 与 BMC 共板的结构，其他拓扑关系都属于 BMC 与 BCU 分离的方式，需要解决 BMC 与 BCU 之间的通信问题。其相互通信一般会采用特定的通信协议来进行。而通信总线的物理连接可采用不同的拓扑结构组合。从外观上看，



BCU 位于中央位置，而每一个 BMC 模块均通过线束与之相连，BCU 中通常还带有一个总线集中模块，使多个 BMC 能共享通信信道。星型连接方式的优点如下：

- 便于进行介质访问控制。
- 某个 BMC 的退出或故障不会对其他 BMC 的通信造成影响。

这种连接方式的缺点如下：

- 通信线路较长，难维护。
- 可扩展性差，受总线集中模块端口的限制，不能随意增加多个 BMC 单元。

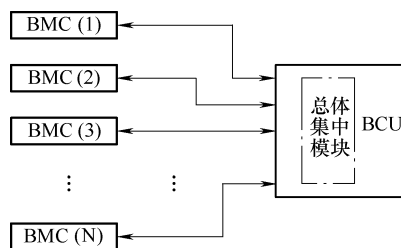


图 7-3-4 星型连接方式

3) 总线型连接方式 (图 7-3-5)。BCU 与 BMC 以总线型的方式进行连接，每块电路板都是通信总线的一部分。与星型连接相比，用于通信信道的线材开销相对较少，连接方式更为灵活，可扩展性强。若动力电池组内需要增加动力电池及相应的 BMC 数量，则只需增加一小段通信线材。反之，若某一个 BMC 需要退出整个系统，则只需把相邻的通信线路延长。总线型连接方式的缺点是通信线路的相互依赖性，即第 N 块电路板要与 BCU 通信，需利用前面 $N-1$ 块板。若其中某一块电路板出故障，则后续의 BMC 与 BCU 之间的通信会立即受影响。

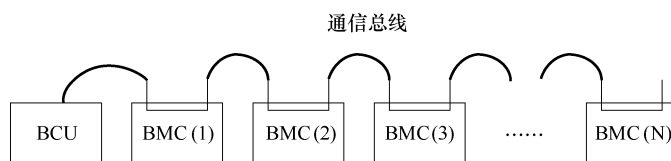


图 7-3-5 总线型连接方式

值得一提的是，无论采用星型还是总线型的物理连接方式，都指的是其拓扑形式，而从通信网络的角度看，两种方式都存在介质访问竞争，BCU 与 BMC 之间常用总线通信协议进行信息交互，需进行隔离设计。

7.3.3 动力电池状态监测的相关问题

(1) 精度

从理论研究的角度，采集精度越高越好，然而精度高的器件对应着较高的成本，不利于产业化。而且采集精度越高，对应的时延相对也越大，这会影响动力电池电压监测的实时性与同步性。由此看来，采集的精度并非越高越好。

1) 动力电池电压采集的精度问题。动力电池电压采集的精度需求，往往与电压数据的服务对象相关。如果电压数据是用于过压保护的，由于磷酸铁锂电池的电压平台区为 $3.2 \sim 3.3\text{V}$ ，而高压保护门限在 3.6V 以上，对电压采样的精度要求相对较低。在动力电池管理系统的各种功能中，对电压采集精度要求较高的是 SOC 估算环节。

一般地，动力电池 SOC 与电动势（近似可理解为开路电压）之间存在对应关系，可根据动力电池的开路电压求得动力电池 SOC。在这种情况下，对电压采集精度的要求就可以转化为对 SOC 估算精度的要求。以某款动力电池为例， $\Delta\text{SOC} = 5\%$ 所对应的最小电动势差值



$\Delta EMF = 0.0019V$ 。由此可见,若系统要求 SOC 的评估误差小于 5%,则电压监测的误差应小于 $0.0019V$,即大概相当于 $2mV$ 。确定电压采集的精度指标后,就需要选择合适的电压采集方式和模/数转换器来实现了。

2) 动力电池电流采集的精度问题。相对于电压、温度等其他物理量,电流监测具有以下特点:

➤ 电流的采样通道少。在动力电池组中,由于动力电池个数多,电压和温度采样点较多。而多个动力电池往往串联使用,各动力电池的工作电流相同,基本上只需对串联后的总电流进行监测,采样通道较少。

➤ 电流的采样频率高。电流的采样频率对 SOC 的评估精度及系统安全性有重要影响。

可从以下三个方面来确定电流监测的精度指标:

① 从安全性的角度考虑。为保证电动车辆的安全,动力电池管理系统对充、放电电流设置门限,通过启动过流保护措施进行防护。一般设定的保护门限值要高于放电电流正常工作电流的最大值,因此即使电流监测存在一定误差,也不会对过流保护功能造成过大影响。

② 从仪表显示的角度考虑。由于电动车辆的工作电流通常较大,仪表显示的电流数值允许有较大误差。但在电动车辆驻车状态下,应控制好仪表显示误差,以免误导驾驶人。

③ 从 SOC 评估的需求考虑。从 SOC 评估需求角度考虑的电流监测精度更需侧重于其相对误差。在电流采样频率足够高(满足奈奎斯特采样定理)的前提下,利用电流积分法(也称电荷累积法或 CC 法)来评估 SOC 的精度直接取决于电流监测的精度。例如,在过去的 1h 内,电流监测的平均相对误差为 5%。那么,利用电流积分所估算的在过去 1h 内所消耗的电量的误差也是 5%。若电流监测存在系统误差,即固定偏大或偏小,则所估算的电量消耗值也会相应偏大或偏小。

3) 温度采集的精度问题。温度测量的误差也会直接影响 SOC 评估的准确度,但 $1 \sim 2^{\circ}C$ 误差所造成的影响很小,而且不会随时间的推移产生累积误差。从安全保护的角度看,温度监测的误差基本不会造成严重影响。从这个方面讲,动力电池管理系统对温度监测误差的容忍程度是很高的。

(2) 时延问题

在动力电池状态监测的问题上,状态信息的采集环节、信息的传递环节、信息的处理环节总会或多或少地存在时延。造成状态信息时延的因素包括动力电池监测回路(BMC)的信息采集环节、通信网络的信息传递环节及动力电池控制单元(BCU)的信息处理环节。

1) BMC 造成的时延。BMC 是与所采集的物理量最接近的芯片及辅助电路。根据不同的应用场合,前端芯片可以是单片机、模/数转换器及某些专为动力电池管理系统设计的芯片,把动力电池电压等模拟信号转换成数字信号。造成时延的主要原因就是模/数转换需要一定时间。通常对一个信号进行 8bit 的模/数转换约需 $100\mu s$,随着转换位数的增大,电压采集的时延增大。

2) 通信网络造成的时延。如果动力电池管理系统中采用了总线网络来传递信息,那么通信的控制方式及通信波特率的设置等因素将造成通信网络的时延。如果通信总线里还有其他节点,则因总线竞争造成的时延将会更大。

3) BCU 造成的时延。BCU 内含有在动力电池管理系统中执行最高决策的芯片,包括安全管理、能量管理、均衡管理等功能,均由主芯片负责实施。但在实际应用中,由于



动力电池数量较多，位置分散，甚至需要分级管理，BCU 与 BMC 之间存在协调问题，造成时延。

在动力电池状态监测的过程中，解决非实时与非同步问题的思路可以从必要性和可行性两个方面着手。就必要性而言，要根据不同应用场合的需求，分析信息延迟的可容忍范围，明确对状态数据监测的实时性、同步性要求，确定设计指标。就可行性而言，根据设计指标的要求，综合成本、可靠性等因素来选择合适的拓扑结构、核心器件、网络参数等，进而得到一个合理的解决方案。比如，我们可通过分析状态信号的特征来选择采样频率，也可根据不同需求，对电流、电压、温度等指标设定不同的采样频率。

(3) 隔离问题

对于多动力电池检测的电路必须考虑通信隔离问题，原因在于两个方面：首先，检测电路由动力电池的局部供电，各局部之间串接而非共地，但通信总线一般要求共地接法，因此存在矛盾。其次，检测电路与动力电池相连，而动力电池在工作过程中电压非恒定，若直接与通信总线连接，则会对通信线路形成干扰。

目前通信隔离的常用手段是光隔离，即两个电路在线路连接上断开，只用光耦合器把信息从一个电路耦合到另一个电路上。为实现双工通信，一般需要为每个通信单元配置 2 个光耦合器。随着技术的发展，解决通信隔离问题的手段也越来越丰富多样。有些单片机芯片有自带的 CAN 总线控制模块，或支持其他总线协议的通信控制模块，甚至自带光隔离模块。除光隔离外，还有其他多种方式来实现通信隔离。

7.3.4 动力电池均衡控制管理

为平衡动力电池组中单体动力电池的容量和能量差异，提高动力电池组的能量利用率，在动力电池组的充放电过程中需要使用均衡电路。动力电池的能量控制管理包括充电控制管理、放电控制管理及均衡控制管理，这些措施可提升动力电池组的整体容量并控制动力电池的充放电深度。能量控制管理功能的效果体现出动力电池管理系统的水平。

如果不对动力电池做均衡控制，则动力电池管理系统的保护机制会在动力电池组中的某个单体动力电池充满电时就对整个串联动力电池组截止充电，并在剩余电量最小的单体动力电池放完电时就对整个串联动力电池组截止放电，即动力电池组的有效容量符合木桶原理，这会造成整个动力电池组的容量不能有效发挥。如果把动力电池从完全放空到完全充满的过程中 SOC 的变化记为 $(0 \sim 100)\%$ ，则在实际应用中，最好让每个单体动力电池都工作在 $5\% \sim 95\%$ 的区间。SOC 大于 95% ，动力电池容易形成过充，同时也容易发生一些不可逆的化学反应，从而影响动力电池的寿命。类似地，SOC 小于 5% ，动力电池容易形成过放，同时也容易发生一些不可逆的化学反应，从而影响动力电池的寿命。试验数据表明，对动力电池组实施均衡控制管理，减小动力电池的充放电深度，对于提高动力电池的安全性、延长动力电池寿命有重要意义。

动力电池均衡控制管理的难点如下。

(1) 单体动力电池的 SOC 评估

过去，某些简单的动力电池均衡算法往往以动力电池的电压作为均衡依据，即认为电压较高的动力电池需要失去电荷，电压较低的动力电池需要补充电荷。而实际上，动力电池均衡的最佳依据应是动力电池的剩余电量或 SOC。电压的监测和判断较为简单，但动力电池的剩余电量或 SOC 的评估却相对困难。



(2) 单体动力电池的容量获取

要获取单体动力电池的容量，有两方面困难：

1) 动力电池容量受 SOH 的影响。一般来说，动力电池一旦装车使用，性能便会不断衰减，有效容量不断减少。然而，每个动力电池的有效容量均有差异，要获得 SOH 值，就必须对每个动力电池单独进行一次充满操作并马上放空。对已经装车使用的动力电池，这样的评估难以经常对每个单体动力电池单独进行。

2) 实际的容量受运行工况限制。即使能知道每个单体动力电池的 SOH，由于难以预计汽车的运行工况，动力电池实际的有效容量仍旧难以获取。

动力电池均衡控制管理的方法如下。

(1) 集中式均衡与分布式均衡

按均衡电路的拓扑结构分类，可分为集中式均衡方案和分布式均衡方案。集中式均衡方案指整个动力电池组共用一个均衡器，通过逆变分压等技术对动力电池组能量进行分配，以实现单体动力电池与动力电池组之间的能量均衡。而分布式均衡方案中，均衡模块是个别单体动力电池专用的。图 7-3-6 所示为一个典型的集中式均衡拓扑结构。该结构中，动力电池组内所有的单体动力电池都可利用同一个均衡器（均衡电容）进行均衡操作。

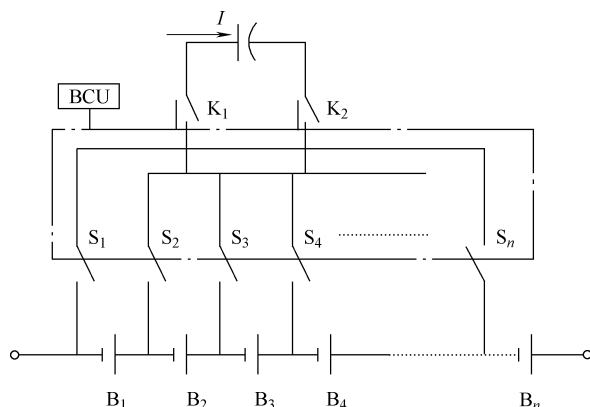


图 7-3-6 一个典型的集中式均衡拓扑结构

图 7-3-7 所示为一种典型的分布式动力电池均衡拓扑结构。该结构在每个单体动力电池上并联一个旁路电阻，并利用一个电子开关来控制均衡操作。

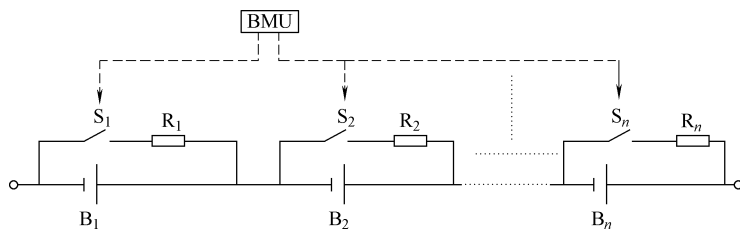


图 7-3-7 一种典型的分散式动力电池均衡拓扑结构



比较以上两种均衡方式，集中式均衡方案能迅速集整个动力电池组之力为待均衡的个别单体动力电池转移能量，所配置的公用均衡器的性能较好，故均衡速度较快。从整体来说，集中式均衡模块的体积也比分散式（总和）小。然而，集中式均衡方案中，各单体动力电池间形成竞争关系，多个单体动力电池的均衡操作不能并行推进，而且各单体动力电池与均衡器间需大量线束连接。可见，集中式均衡方案不太适合单体动力电池数量较多的动力电池组。

（2）放电均衡、充电均衡与双向均衡

按照均衡的作用过程不同，可将均衡控制管理分为放电均衡、充电均衡和双向均衡。放电均衡方式指在放电过程中实现各单体动力电池间的均衡，以保证放电过程中能将动力电池组中每个单体动力电池的剩余容量放至0，而不会出现有的单体动力电池已放电完全，而有的单体动力电池尚有电量的情况。放电完全后，用恒定电流以串联充电的方式对动力电池组充电，直到动力电池组中有任何一个单体动力电池的剩余容量达到100%时结束充电。整个过程可用图7-3-8来表示。

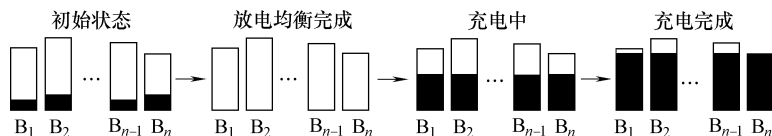


图 7-3-8 放电均衡方式

从图7-3-8可以看出，放电均衡方式可保证每一次充进动力电池的电量都可完全释放出来。但在充电过程中，根据“短板原理”，只能以最小容量的单体动力电池为截止上限。这样，在充电过程中就不能完全利用动力电池组的容量。

放电均衡的缺点是能量损耗过多，不便在任何时候都进行（例如在动力电池剩余容量比较多的情况下，进行放电均衡代价过大）。此外，放电均衡需把动力电池剩余容量放空，从而提高了放电深度，有可能影响动力电池的循环寿命。

充电均衡方式指在充电过程中采用上对齐均衡充电方式，实现各单体动力电池间的均衡，以保证充电过程中能将动力电池组中每个单体动力电池的容量都充至100%，如图7-3-9所示。

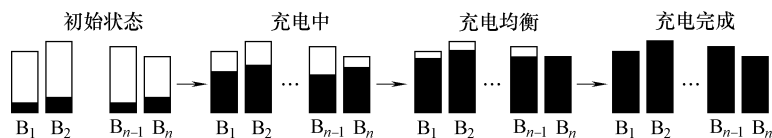


图 7-3-9 充电均衡方式

充电均衡方式可保证每一个单体动力电池的实际容量在充电过程中都发挥出功效。但充电均衡方式对放电过程没有任何控制，其放电过程满足木桶原理，即整个动力电池组的放电容量取决于容量最小的单体动力电池。与放电均衡相反，充电均衡在动力电池组处于任何SOC的状态下都适用。



双向均衡方案综合了放电均衡方案和充电均衡方案的优点，在充电和放电过程中都引入均衡控制，这样既能保证每一个单体动力电池都放电到 SOC 下限，又能保证每一个单体动力电池都充电到 SOC 为 100%。由于加入了放电均衡过程，这种方案同样存在能量损耗过多，容易损害动力电池等问题。但这种方法有利于评估动力电池最大容量，可用于动力电池健康状况评估。

(3) 耗散型均衡与非耗散型均衡

按照在均衡过程中，是否努力尝试对动力电池组的能量进行保护，可将均衡控制方案分为耗散型均衡和非耗散型均衡两种。

1) 耗散型均衡。耗散型均衡方案指利用并联电阻等方式将动力电池组中 SOC 较高的单体动力电池的能量消耗掉，直到其与组内其他单体动力电池达到均衡。该方法的实现过程为：定时检测各单体动力电池的电压，当某些单体动力电池的电压超过动力电池组平均电压时，接通这些高能动力电池的并联电阻，使它们的一部分能量消耗在并联电阻上，直到它们的电压值等于动力电池组平均电压。

耗散型均衡方案控制逻辑简单，硬件上容易实现，成本较低，是早期均衡控制最常用的方案。然而，这种方法是消耗动力电池组的部分能量为实施手段的，均衡过程一般在充电过程中完成，对容量低的单体动力电池不能补充电量，存在能量浪费和增加热管理系统负荷的问题。对于电动车辆而言，存在通风不好导致过热的安全隐患。

能量耗散型均衡充电电路一般又分恒定分流电阻均衡充电电路、开关控制分流电阻均衡充电电路两类，两者的优缺点见表 7-3-3。

表 7-3-3 两种能量耗散型均衡充电电路的优缺点

	优 点	缺 点	备 注
恒定分流电阻均衡充电电路	可靠性高，分流电阻大，通过固定分流来减小因自放电导致的单体动力电池差异	无论动力电池充电还是放电，分流电阻始终消耗功率，能量损失大，一般在能及时补充能量的场合适用	每个电池动力单体上都始终并联一个分流电阻
开关控制分流电阻均衡充电电路	可对充电时单体动力电池电压偏高者进行分流	受均衡时间的限制，分流时产生的大量热量需要及时通过热管理系统耗散，尤其在容量比较大的动力电池组中更加明显	分流电阻通过开关控制，在充电过程中，当单体动力电池电压达到截止电压时，均衡装置能阻止其过充并将多余能量转化成热能

2) 非耗散型均衡。非耗散型均衡（也称无损均衡）指利用中间储能元件和一系列开关元件，将动力电池组中 SOC 较高的单体动力电池的能量转移到 SOC 较低的单体动力电池中去，以达到均衡目的。无损均衡方案用到的中间储能元件一般有电容和电感两种。无损均衡正好可弥补耗散型均衡的缺点，但它也存在控制逻辑电路复杂等缺点。此外，由于器件损耗，非耗散型均衡并不能做到真正的无损。

非能量耗散型电路的耗能相对于能量耗散型电路小很多，但其电路结构相对复杂，可分为能量转换式均衡和能量转移式均衡两种方式。

① 能量转换式均衡。能量转换式均衡通过开关信号，利用动力电池组整体能量对单体



动力电池进行补充,或将单体动力电池能量向整体动力电池组转换。其中,单体能量向整体能量转换,一般都在动力电池组充电过程中进行。该电路通过检测各单体动力电池的电压值,在单体动力电池电压达到一定值时开始工作。把单体动力电池中的充电电流进行分流,从而降低充电电压,分出的电流经模块转换把能量反馈回充电总线,达到均衡目的。还有的能量转换式均衡可通过续流电感,完成单体到动力电池组的能量转换。

动力电池组整体能量向单体转换也称补充式均衡,即在充电过程中先通过主充电模块对动力电池组进行充电,电压检测电路对每个单体动力电池进行监控。任一单体动力电池的电压过高时,主充电电路就会关闭,然后补充式均衡充电模块开始对动力电池组充电。通过优化设计的均衡模块中,充电电压经过一个独立的DC/DC变换器和一个同轴线圈变压器,给每个单体动力电池上增加相同的二次绕组。这样,电压高的单体动力电池从辅助充电电路上得到的能量少,而电压低的单体动力电池从辅助充电器上得到的能量多,从而达到均衡目的。

此方式的问题在于二次绕组的一致性难以控制,即使副边绕组匝数完全相同,考虑到变压器漏感及副边绕组之间的互感,单体动力电池也不一定获得相同的充电电压。同时,同轴线圈也存在一定的能量耗散,只对充电起均衡作用,对放电均衡不起作用。

② 能量转移式均衡。能量转移式均衡利用电感或电容等储能元件,把动力电池组中容量高的单体动力电池,通过储能元件转移到容量较低的单体动力电池上。该电路通过切换电容开关传递相邻单体动力电池间的能量,将电荷从电压高的单体动力电池传送到电压低的单体动力电池,从而达到均衡目的。另外,也可通过电感储能的方式,对相邻单体动力电池间进行双向传递。此电路的能量损耗很小,但均衡过程中必须有多次传输,均衡时间长,不适于多串动力电池组。改进的电容开关均衡方式,可通过选择最高电压与最低电压单体动力电池来进行能量转移,从而提高均衡速度。能量转移式均衡中,能量的判断及开关电路的实现较困难。

除上述均衡方法外,在充电应用过程中,还可采用涓流充电的方式实现动力电池的均衡。这是最简单的方法,不需外加任何辅助电路。其方法是对串联动力电池组持续用小电流充电。由于充电电流很小,过充对充满动力电池所带来的影响并不严重。由于已经充满的动力电池没办法将更多的电能转换成化学能,多余的能量将会转化成热量。而对于没有充满的动力电池,却能继续接收电能,直至完成满充点。这样,经过较长的周期,所有的动力电池都会达到满充状态,从而实现容量均衡。但这种方法需很长均衡充电时间,且消耗相当大的能量来达到均衡。另外,在放电均衡管理上,这种方法是不能起任何作用的。

7.4 动力电池的特性测试

动力电池测试是动力电池研制、出厂检测、产品评估等的必要手段。作为电动车辆的能量源,从保证交通工具必要的性能和安全性角度出发,相关行业管理部门也针对动力电池、动力电池组甚至动力电池系统的测试制订了详细的测试规程和检验标准。虽然电动车辆产业尚处于初级阶段,标准也会随应用范围和深度而逐步修改完善,但对于性能和安全性测试问题,其基本方法和要求应保持相对稳定。

7.4.1 动力电池特性测试的内容

化学电源的电化学基本性能包括容量、电压、内阻、自放电、存储性能、高低温性能



等,动力电池作为典型的二次化学电源还包括充放电性能、循环性能、内压等。因此,动力电池的性能测试内容包括充电性能测试、放电性能测试、放电容量及倍率性能测试、高低温性能测试、能量和比能量测试、功率和比功率测试、存储性能及自放电测试、寿命测试、内阻测试、内压测试和安全性测试等。

(1) 实际容量测试

实际容量指动力电池实际能放出电荷的多少。动力电池生产厂家在产品出厂时提供了动力电池的额定容量,该容量是根据有关标准以特定的放电倍率在特定的温度条件下测得的。动力电池容量的测试方法有恒流放电、恒阻放电、恒压放电、恒压恒流放电、连续放电和间歇放电等。根据放电的时间和电流的大小可计算动力电池的容量。在进行动力电池管理系统开发前,应选取动力电池样品,测量其在不同温度及不同放电倍率下的实际容量,从而使BMS中的SOC估算算法能在不同工况、不同环境温度下适用。不仅如此,这一特性测试,对于动力电池的均衡管理、充放电能量控制等其他方面,都有非常重要的意义。

实际容量测试一般又包括以下测试内容:

1) 静态容量检测。用于确定车辆在实际使用时动力电池组是否具有充足的电量和能量,满足各种预定放电倍率和温度下正常工作需求。主要的试验方法为恒温条件下恒流放电测试,放电终止以动力电池组电压降低到设定值或动力电池组内的单体一致性(电压差)达到设定值为准。

2) 动态容量检测。用于检测动力电池组在动态放电条件下的能力。其主要表现为不同温度 and 不同放电倍率下的能量和容量。主要测试方法为采用设定的变电流工况或实际采集的车辆应用电流变化曲线,进行动力电池组的放电性能测试,试验终止条件根据试验工况以及动力电池的特性有所调整,基本以电压降低到一定值为标准。该方法可更加直接和准确地反应电动车辆的实际应用需求。

3) 静置试验。自放电及存储性能指在开路状态下,动力电池存储电量在一定环境条件下的保持能力。这项试验用于检测动力电池组在一段时间未使用时的容量损失,用来模拟电动车辆一段时间没有行驶而动力电池开路静置时的情况。

(2) 充放电效率测试

充放电效率指从能量的角度,动力电池所能有效放出的能量与充入能量的比例。在不同温度、不同放电倍率的前提下,这一指标有所区别,应分别进行测试。快速充电能力测试是充放电效率测试的一项重要内容。其目的是通过对动力电池组进行高倍率充电来检测动力电池的快速充电能力,并考察其效率、发热及对其他性能的影响。对于快速充电,USABC的目标是15min内动力电池SOC从40%恢复到80%。目前,日本CHADeMO协会制定的标准要求电动车辆动力电池组充电10min左右可保证车辆行驶50km,充电时间超过30min可保证车辆行驶100km。

(3) 放电倍率特性测试

放电倍率特性测试指测试一个动力电池在正常工作中,所能放出的最大电流的特性。所能放出的最大电流与工作环境温度及动力电池的剩余容量相关。一般来说,环境温度越高,动力电池内的物质活性越高,最大放电电流越大。同样,动力电池的剩余电荷越多,所能放出的最大电流也越大。这一特性测试,对于动力电池的安全保护功能及充放电能量控制具有重要意义。常用的电流检测方式有分流器、互感器、霍尔元件电流传感器和光纤传感器等4



种，各种方法的特点见表 7-4-1。

表 7-4-1 各种电流检测方法的特点

项 目	分流器	互感器	霍尔元件电流传感器	光纤传感器
插入损耗	有	无	无	无
布置形式	需插入主电路	开孔、导线传入	开孔、导线传入	—
测量对象	直流、交流、脉冲	交流	直流、交流、脉冲	直流、交流
电气隔离	无隔离	隔离	隔离	隔离
使用方便性	小信号放大、需隔离处理	使用较简单	使用简单	—
适用场合	小电流、控制测量	交流测量、电网监控	控制测量	高压测量，电力系统常用
价格	较低	低	较高	高
普及程度	普及	普及	较普及	未普及

其中，光纤传感器昂贵的价格影响了其在控制领域的应用。分流器成本低、频响应好，但使用麻烦，必须接入电流回路。互感器只能用于交流测量。霍尔传感器性能好，使用方便。目前在电动车辆动力电池管理系统电流采集与监测方面应用较多的是分流器和霍尔传感器。

(4) 动力电池内阻、内压的测试

动力电池内阻指动力电池工作时，电流流过其内部所受到的阻力，一般分为交流内阻和直流内阻。由于动力电池内阻很小，测直流内阻时会因电极容易极化而产生极化内阻，无法测出其真实值。而测其交流内阻可避免极化内阻的影响，得出真实的内阻值。交流内阻测试方法是利用动力电池等效于一个有源电阻的特点，给动力电池通入一个 1000Hz、50mA 的恒定电流，对其进行电压采样、整流、滤波等一系列处理，从而精确测量其阻值。可用专门的内阻仪来测试。

动力电池的内压是充放电过程中产生的气体所形成的压力，主要受动力电池材料、制造工艺、结构、使用方法等因素影响。一般动力电池内压均维持在正常水平，在过充或过放情况下，动力电池内压可能会升高。例如，过充电时正极产生的氧气透过隔膜纸与负极复合，如果负极反应的速度低于正极反应的速度，则产生的氧气来不及被消耗掉，就会造成动力电池内压升高。

(5) 起动功率测试

由于电动车辆起动功率较大，为适应不同温度条件下的起动需要，应对动力电池组进行低温（-18℃）起动功率和高温（50℃）起动功率测试。这项测试除在设定温度下进行外，为确定动力电池在不同 SOC 的放电能力，一般还将 SOC 设定在不同值，以检测不同 SOC 值时电动车辆的起动加速度等能力。

(6) 动力电池寿命测试

动力电池的循环寿命指在一定的充放电制度下，容量降至某一规定值前，动力电池所能承受的循环次数。动力电池的循环寿命直接影响其使用经济性。影响动力电池循环寿命的因素有电极材料、电解液、隔膜、制造工艺、充放电制度、环境温度等，在进行寿命测试时，要严格控制测试条件。



动力电池寿命测试采用的主要测试方法是在一定条件下进行充放电循环，然后检测动力电池容量的衰减程度，当动力电池容量低于额定容量的 80% 时终止实验。此时的循环次数就是动力电池的循环寿命。动力电池的寿命测试周期比较长，一般试验周期需要数月甚至 1 年时间，因此在实际操作中，经常采用确定测试循环数量，测定容量衰减情况，并据此数据进行线性外推的方法进行测试。在研究领域，为缩短动力电池的寿命测试时间，也在研究通过增加测试温度、充放电倍率等加速动力电池老化的方式进行动力电池及动力电池组寿命测试。

对不同类型的动力电池，循环寿命的测试规定是不同的。具体可参考相应国家标准或国际电工委员会（IEC）制订的标准。动力电池的寿命也可用专用的动力电池循环寿命检测设备来测试。

（7）自放电及储存性能的测试

动力电池的储存性能指动力电池开路时，在一定的温度、湿度等条件下储存时容量下降率的大小，是衡量动力电池综合性能稳定程度的重要参数之一。动力电池经过一定时间储存后，允许其容量及内阻有一定程度的变化。经过一段时间的储存，可让动力电池内部各成分的电化学性能稳定下来，可了解该动力电池的自放电性能，以保证其品质。

自放电又称荷电保持能力，指在开路状态下，动力电池储存的电量在一定环境条件下的保持能力。一般而言，自放电主要受制造工艺、材料、储存条件的影响。自放电是衡量动力电池性能的主要参数之一。

一般而言，动力电池储存温度越低，自放电率也越低，但也应注意温度过低或过高均有可能造成动力电池损坏而无法使用。动力电池充满电开路静置一段时间后，一定程度的自放电属于正常现象。

（8）动力电池安全性能测试

动力电池的安全性能指动力电池在使用及静置期间对人和装备可能造成危害的评估。尤其是动力电池在被滥用时，由于特定的能量输入，导致其内部组成物质发生物理或化学反应而产生大量热量，若热量不能及时散逸，则可能导致动力电池热失控。热失控会使动力电池毁坏，导致猛烈的泄气、破裂，并伴随起火，造成安全事故。在众多化学电源中，锂电池的安全性尤为重要。

动力电池的安全性测试项目非常多，不同类型的动力电池，安全性能测试项目也不同，可根据相关标准和技术需求选择测试。在 QC/T 743—2006《电动汽车用锂离子蓄电池》中，规定的电池安全性能测试项目主要包括过放电、过充电、短路、跌落、加热、挤压、针刺测试。

通用动力电池安全测试项目见表 7-4-2。

表 7-4-2 通用动力电池安全测试项目

类 别	主要测试方法
电性能测试	过充电、过放电、外部短路、强制放电等
机械测试	自由落体、冲击、针刺、振动、挤压等
热测试	焚烧、热成像、热冲击、油浴、微波加热等
环境测试	高空模拟、浸泡、耐菌性等



其中,动力电池振动测试是一项重要内容,用于检测因道路引起的频繁振动和撞击对动力电池及动力电池组性能和寿命的影响。动力电池振动测试主要考察动力电池(组)对振动的耐久性,并以此作为指导完善动力电池(组)在结构设计上的不足的依据。振动试验中的振动模式一般使用正弦振动或随机振动两种。由于动力电池(组)主要装载于车辆上使用,为更好地模拟动力电池的使用工况,一般采用随机振动。

(9) 温升测试

不管是充电还是放电过程,所有动力电池都是依靠电化学反应来工作的,这些化学反应的速率受温度影响。如果动力电池在较高或较低温度下工作,实际性能可能会大幅度偏离设计指标。在评估动力电池的剩余容量时,必须充分考虑温度因素。因为在不同的温度条件下,动力电池所能放出的电荷量是不同的,所能提供的能量也是不同的。

任何动力电池都有一个允许的工作温度范围。若动力电池的工作温度超过了允许范围的上限,则可能导致以下不良情况发生:

- 活性化学物质扩大导致单体动力电池膨胀。
- 动力电池组件机械变形,可能会导致电路短路或开路。
- 可能发生不可逆的化学反应造成活性化学物质永久性减少,进而导致动力电池容量减少。
- 长时间在高温下操作可能导致动力电池的塑料部分裂解。
- 可能溢出气体。
- 动力电池内部压力升高。
- 动力电池可能破裂或爆炸。

若动力电池的工作温度低于允许范围的下限,则电解液可能冻结,使化学反应速率降低,动力电池性能会开始恶化。通常而言,磷酸铁锂电池在低于 -30°C 的环境温度下,基本不能正常工作。可见,采取动力电池组热管理措施是必要的。

动力电池组热管理的根本目的,就是尽量使动力电池始终工作在较为安全、高性能的温度区间内。热管理与普通温度保护的区别在于,普通温度保护只是在动力电池可能发生或已经发生故障时,对电路进行控制或保护。而热管理更强调的是采取各种措施,使动力电池工作在比较合适的温度范围内。目前,动力电池组的热管理已成为动力电池管理系统的一项重要功能。动力电池组的热管理牵涉到电化学与热化学等多个领域的知识,而且热管理的手段也因具体的电动车辆应用场合而存在较大差异。

在动力电池管理系统中,需要监测的温度信息主要包括环境温度、动力电池箱的温度及动力电池本身的温度。其中,环境温度信息单一,更容易获取,可通过监测不同位置的环境温度来推算动力电池不同位置的温度。同时,由于动力电池的热量是自内而外散发的,环境温度变化会影响动力电池热量的散发,若能提前监测到环境温度的变化,则可预测动力电池外表温度的升高趋势。

7.4.2 动力电池特性测试的相关标准及主要测试项目

本节列举4个与电动车辆动力电池相关的测试标准,其中第1个可归类为针对动力电池制造商的测试标准,后3个可归类为针对电动车辆制造商的测试标准,见表7-4-3。



表 7-4-3 电动车辆动力电池相关的测试标准

标准名	适用范围	标准内容
中国汽车行业标准 QC/T 743—2006——电 动汽车用锂离子蓄电池	该行业标准由国家发改委于 2006 年 3 月发布，2006 年 8 月正式实施，适用于电动汽车的、标称电压为 3.6V 的单体锂离子蓄电池及由此类电池组成的“ $n \times 3.6V$ ”的蓄电池模块	测试项目涵盖了蓄电池的外观、极性、尺寸质量、放电容量、荷电保持能力与容量恢复能力、循环寿命和安全性能。该测试标准对蓄电池模块还特意设置了能反映其是否匹配电动汽车性能的简单模拟工况测试和耐振测试。QC/T743—2006 标准中，明确给出了各测试项目的具体步骤，并制订了蓄电池及蓄电池模块在各测试项目中所应达到的指标
SAE J1798——电动车 辆蓄电池组性能评价的 推荐规程	SAE (Society of Automotive Engineers, 美国机动车工程师学会) 成立于 1905 年，是国际上规模最大的汽车工程学术组织。SAE 所制订的标准具有权威性，广泛地为汽车行业及其他行业所采用，并有相当部分成为美国国家标准	SAE J1798 列出了一系列蓄电池性能指标的测试实验，包括静态容量测试、荷电保持能量测试、充电接受能力测试、峰值功率能力测试和动态容量测试。该标准还规定了测试模块的选取、测试条件、测试温度、传感器位置、采样频率、测量精度等细节问题，是非常严谨的测试标准
IEC 61982-3——标准 道路电动汽车用二次电 池第三部分：性能和使用 寿命测试	IEC 是国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission) 的缩写，该委员会成立于 1906 年，是世界上成立最早的国际性电工标准化机构，负责有关电气工程 and 电子工程领域中的国际标准化工作。 IEC 61982-3 标准的测试对象为城市用小型低速电动汽车上的电能储存系统，该标准不适用于特殊用途车辆，例如公共交通工具、垃圾收集车辆、摩托车和大型商业用车的电能储存系统测试	该标准是根据测试对象车辆所要求的性能来制定的验证性测试。主要包括 3 个基础性试验：容量测试、功率性能测试和使用寿命测试。另外，还有一些可选的测试项目，如最大功率测试、蓄电池电阻测试、充电测试、工作电压范围测试等。该测试标准可帮助电动汽车生产商判断所测蓄电池能否满足开发电动汽车的性能需求，并为电动汽车生产商在多个品牌的动力电池之间进行比较筛选提供依据
PNGV 电车测试手册	该测试标准是美国 Idaho 国家工程与环境实验室 (INEEL, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory) 为美国新一代汽车合作计划 (PNGV, Partnership for a New Generation of Vehicles) 制定的电池测试标准。 PNGV 计划针对功率辅助型和双模混合动力电动汽车分别制定了能量储存系统性能目标。该标准所设计的蓄电池测试，旨在验证待测蓄电池是否满足 PNGV 计划制定的汽车性能目标	该标准定义了静态容量测试、混合脉冲功率特性测试、可用能量测试、自放电测试等项目。与其他测试标准不同的是，该标准除定义上述测试项目的测试方法外，还详尽地给出了测试应记录的数据，应得到的结果，并对结果做了一些分析。因此，这不仅是一个标准测试，也是一本讲述蓄电池特性及原理的参考书

根据动力电池的不同类型，测试的具体参数与要求会有所差异。表 7-4-4 是常用锂离子动力电池的标准测试项目及指标。



表 7-4-4 电动车辆锂离子动力电池标准测试项目及指标

项 目		检 测 方 法	指 标 要 求
外观		检查标志、外观	
常温放电性能		20℃ ± 5℃, 终止电压 3.0V, 1I ₃ (A) 放电	>110%
高温性能		55℃ ± 2℃ 恒温 5h, 1I ₃ (A) 放电, 终止电压 3.0V, 1I ₃ (A) 放电	>95%
低温性能		-20℃ ± 2℃ 恒温 20h, 1I ₃ (A) 放电, 终止电压 2.8V	>70%
荷电保持能力		20℃ ± 5℃ 搁置 28 天, 1I ₃ (A) 放电, 终止电压 3.0V	>80%
环境适应性	恒定湿热性能	40℃ ± 2℃, 湿度 90% ~ 95%, 搁置 48h, 20℃ ± 5℃ 搁置 2h 1I ₃ (A) 放电, 终止电压 3.0V	无明显变形、锈蚀、冒烟式爆炸
	振动	三维方向从 10 ~ 55Hz 循环扫频振动 30min, 扫频速率 1oct/min 振动频率: 10 ~ 30Hz, 位移幅值 (单振幅): 0.38mm 振动频率: 30 ~ 55Hz, 位移幅值 (单振幅): 0.19mm	不出现放电电流锐变、电压异常等
	碰撞	三维方向固定, 脉冲峰值加速度: 100m/s ² 碰撞次数: 1000 ± 10 次, 40 ~ 80 次/min 脉冲持续时间: 16ms	无明显变形、锈蚀、冒烟式爆炸
	自由跌落	最低点高度: 1000mm; 厚度 18 ~ 20mm 硬木板置于水泥地面 三维 6 个方向各自由跌落 1 次 1 I ₃ (A) 放电, 终止电压 3.0V 可充放电循环次数不多于 3 次	不漏液、不冒烟、不爆炸
安全保护性能	过充电保护性能	恒流: 3 I ₃ (A) 外接电流; 充电主蓄电池电压达到 5V 或充电时间达到 90min	不爆炸、不起火、不冒烟或漏液
	过放电保护性能	20℃ ± 5℃, 1 I ₃ (A) 充电, 终止电压 0V	不爆炸、不起火、不冒烟或漏液
	短路保护性能	外部短路 10min, 外部电路电阻应小于 5mΩ	不爆炸、不起火、不冒烟或漏液
蓄电池安全性能	重物冲击	10kg 重锤自 1m 高度自由落下, 冲击蓄电池	不爆炸、不起火
	热冲击	(5℃ ± 2℃) /min 的速率升温至 130℃ ± 2℃, 保温 30min	不爆炸、不起火
循环寿命		充电: 20℃ ± 5℃ 下以 1 I ₃ (A) 充电至电压 4.2V, 转恒压充电, 至电流小于 0.1 I ₃ (A) 放电: 在 20℃ ± 2℃ 下以 1.5I ₃ (A) 放电, 直到放电容量达到额定容量 80%	>500 次



(续)

项 目	检 测 方 法	指 标 要 求
储存	样品蓄电池生产日期至试验日期, 在 3 个月内 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, $0.2I_5$ (A) 充电至 40%~50% 容量 搁置 12 个月, $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 45%~ 85%, $0.2I_5$ (A) 充电至限压, 转恒压充电至 电流 $<0.01 I_5$ (A) $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, $0.2I_5$ (A) 放电, 终止电压 2.75V/节	$>4\text{h}$

注: 1. 上表主要参考 QC/T 743-2006 和 GB/T18287-2000。

2. I_3 为 3h 率放电电流, I_5 为 5h 率放电电流。

7.4.3 动力电池特性测试的相关仪器设备

动力电池检测仪器主要包括动力电池充放电性能试验台 (充放电设备、温度测量设备、内阻检测设备)、环境模拟试验系统 (温度、湿度、振动、温度冲击)、动力电池安全性检测设备 (挤压试验机、针刺试验机、冲击试验机、跌落试验机) 等。

(1) 充放电性能试验台

1) 充放电性能检测设备。动力电池充放电性能检测是最基本的性能检测, 一般由充放电单元和控制程序单元组成, 可通过计算机远程控制动力电池恒压、恒流或设定功率曲线进行充放电。通过电压、电流、温度传感器可进行相应的参数测量及实现动力电池容量、能量、动力电池组一致性等评价参数。

一般试验设备按功率和电压等级分类, 以适应不同电压等级和功率等级的动力电池及动力电池组性能测试需要。例如, 通用的动力电池单体测试设备, 一般选择工作电压范围 $0 \sim 5\text{V}$, 工作电流范围 $0 \sim 100\text{A}$, 可满足多数车辆用动力电池基本性能测试的要求。对大功率动力电池组的基本性能测试, 电压范围需根据动力电池组的电压范围进行选择, 常用的通用测试设备要求在 $0 \sim 500\text{V}$, 功率要求在 $150 \sim 200\text{kW}$ 。

2) 内阻检测设备。动力电池内阻是二次测量参数, 测试方法包括方波电流法、交流电桥法、交流阻抗法、直流伏安法、短路电流法和脉冲电流法等。

直流放电法比较简单, 且在工程实践中较常用。该方法通过对动力电池进行瞬间大电流 (一般为几十安培到上百安培) 放电, 测量动力电池上的瞬时电压降, 通过欧姆定律计算出动力电池内阻。交流法通过对动力电池注入一个低频交流电流信号, 测出动力电池两端的低频电压和流过的低频电流及两者的相位差, 从而计算出动力电池的内阻。目前, 设备厂家研制生产的动力电池内阻测试设备多以交流法为基础进行测试。

3) 温度测量设备。动力电池在充放电过程中的温升是重要测试参数之一, 但一般的测试只能测量动力电池壳体的典型位置参数, 在充放电设备上带有相应的温度采集系统, 具有充放电过程温度数据同步的功能。除此之外, 专业的温度测试设备还包括非接触式测温仪及热成像仪。热成像仪可采集动力电池一个或多个表面温度的变化历程, 并可提取典型的测量点的温度变化数据, 是进行动力电池温度场分析的专业测量设备。



(2) 环境模拟试验台

动力电池常用的应用环境模拟包括温度、湿度及在车辆上应用时随道路情况变化而出现的振动环境。因此,在环境试验方面主要考虑这3个方面。可采用独立的温度试验箱、湿度调节试验箱、振动试验台进行相关的单一因素影响的动力电池环境模拟试验。但在实际的动力电池应用工况下,是3种环境参数的耦合。因此在环境模拟方面,有温、湿度综合试验箱及温、湿度、振动三综合试验台。为考核动力电池对温度变化的适应性,还需设计温度冲击试验台,进行快速变温情况下动力电池的适应性试验。

(3) 动力电池滥用试验设备

动力电池滥用试验设备是模拟动力电池在车辆碰撞、正负极短路、限压限流失效等条件下,是否会出现着火、爆炸等危险状况的试验设备。针刺试验机、冲击试验机、跌落试验机、挤压试验机等可模拟车辆发生碰撞事故时,动力电池可能出现的损伤形式。短路试验机、被动燃烧试验平台等可模拟动力电池被极端滥用情况下可能出现的损伤形式。采用充放电试验平台可进行动力电池过充或过放等滥用情况测试。

7.4.4 动力电池特性仿真分析工具

仿真分析,即模拟实际运行工况进行的试验。根据仿真分析所采取的手段,可分为硬件仿真和软件仿真。硬件仿真根据实际运行工况设定一定的测试要求,并通过上述测试设备进行模拟试验来达到仿真测试目的。软件仿真是对研究对象进行数学建模,并根据实际工况设定模型参数,并通过仿真软件达到分析目的。两者经常混合使用,以实现复杂的仿真测试。

针对不同的试验要求有不同的仿真软件。对动力电池的性能仿真,常用的仿真软件有 Labview、Matlab/Simulink 等。对动力电池系统与电动车辆的匹配与运行仿真,常用的软件有 Advisor、Matlab/Simulink 等。对动力电池的被动安全性仿真,常用的仿真软件有 ANSYS 等有限元分析软件。

(1) Matlab/Simulink 仿真平台

Matlab 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件,用于算法开发、数据可视化、数据分析及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境,主要包括 Matlab 和 Simulink 两大部分。

Matlab 是当今最流行的通用计算软件之一。Simulink 是基于 Matlab 的图形化仿真平台,是 Matlab 提供的进行动态系统建模、仿真和综合分析的集成软件包。Simulink 和 Matlab 之间可灵活进行交互操作。

Matlab 语言语法简洁,代码接近于自然数学描述方式,具有丰富的专业函数库,吸引了众多科学研究者,逐渐成为科学研究、数值计算、建模仿真,以及学术交流的事实标准。

Simulink 是 Matlab 最重要的组件之一,它提供了一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。Simulink 作为 Matlab 语言上的一个可视化建模仿真平台,采用方框图建模的形式,更贴近于工程习惯。Simulink 是基于 Matlab 的框图设计环境,可用来对各种动态系统进行建模、分析和仿真,它的建模范围广泛,可针对任何能用数学来描述的系统进行建模。在该环境中,无需大量书写程序,而只需通过简单直观的鼠标操作,就可构造出复杂的系统。Simulink 具有适应面广、结构和流程清晰及仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点。目前,Simulink 已被广泛应用于控制理论和数字信号处理的复杂仿真和设计领域。同时有大量的第三方软件和硬件可应用于或被要求应用于 Simulink。



目前, Matlab/Simulink 的应用已远远超越数值计算和控制系统仿真等传统领域, 在几乎所有理工学科中形成了为数众多的专业工具库和函数库, 已成为科学研究和工程设计中常用的工具。

动力电池模型可在 Matlab/Simulink 的环境下编程, 以此作为电动车辆的电源进行仿真。

(2) Labview 测试仿真平台

Labview 由美国国家仪器 (NI) 公司研制开发, 是一种图形化的编程语言开发环境, 它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受, 被视为一个标准的数据采集和仪器控制软件。Labview 集成了与满足 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通信的全部功能。它还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数。利用它可方便地建立自己的虚拟仪器, 其图形化的界面使编程及使用过程变得生动有趣。

(3) Advisor 软件仿真平台

Advisor 是由美国可再生能源实验室在 Matlab 和 Simulink 软件环境下开发的电动车辆仿真软件。该软件于 1994 年投入使用, 它也是目前世界上能在网站免费下载的用户数量最多的电动车辆仿真软件。

Advisor 主要是在给定的驾驶循环下利用车辆的各部分性能, 快速地分析车辆的燃油经济性、动力性能及排放特性等。它也能为用户自定义的动力驱动系统组成及整车控制策略进行详细的建模和仿真。其具体功能如下:

- 模拟整车在一个或多个循环工况下的经济性能和排放性能。根据输入零部件参数和控制参数的不同, 可得到不同的仿真结果, 还可动态比较各种参数的变化对经济性能和排放性能的影响。

- 模拟整车的动力性能 (加速性能、爬坡性能), 并研究不同的零部件参数及控制参数的变化对汽车动力性能的影响。

- 模拟各零部件的输入变量、输出变量 (转矩、功率、速度等) 对另一变量 (循环时间、车速等) 的变化历程。

- 根据要求车辆达到的加速性能及坡度性能, 自动调整车辆的零部件参数。该功能可用于车辆设计过程的初步设计阶段, 用于初步检查车辆零部件的匹配情况。

- 评价混合动力车辆的能量管理策略 (整车控制策略), 即以车辆所要求的加速性能及坡度性能为约束条件, 评价并优化整车的控制策略。

Advisor 采用的是后向仿真和前向仿真相结合的建模方法, 以后向仿真为主, 附加了一些简单的前向仿真计算。在仿真过程中, 按照计算步骤, 先计算后向模型的结果, 即各仿真变量的需求值, 然后计算前向模型的结果, 即各仿真变量的可能值。其最大优点是各总成模块易于扩充和改进。Advisor 模型库里包含几十种汽车 Simulink 模型, 用户可根据自己的需要, 通过修改已有的模型或建立新模型来建立自己所需要的车辆模型。

同时, Advisor 是一个图形化面向对象的环境, 拥有良好的图形用户界面 GUI (Graphical User Interface), 便于用户操作, 且各种仿真结果都能可视化。Advisor 有 3 个主要的 GUI: 车型输入界面、仿真设置界面和结果输出界面。通过这 3 个界面, 用户输入要仿真的车型和各种总成的相关参数, 选择仿真的试验方案和具体项目, 然后进行仿真计算, 最后得到所需要的仿真结果。



(4) ANSYS 有限元仿真平台

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一——美国 ANSYS 公司开发，它能与多数 CAD 软件对接，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer、NASTRAN、IIDEAs、AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。ANSYS 软件功能强大，包括结构静力分析、结构动力学分析、结构非线性分析、动力学分析、热分析、电磁场分析、流体动力学分析、声场分析和压电分析等功能模块，可协助设计人员完成多学科仿真分析及产品优化设计。

7.5 动力电池 SOC 的评估

7.5.1 动力电池 SOC 评估的作用

SOC 是防止动力电池过充和过放的主要依据，只有准确估算动力电池组的 SOC 才能有效提高动力电池组的利用效率，保证动力电池组的使用寿命。在电动汽车中，准确估算动力电池 SOC 的作用包括以下四点：

1) 保护动力电池。对动力电池而言，过充电和过放电都可能对其造成永久性损害，严重减少其使用寿命。如果可提供准确的 SOC 值，则整车控制策略可将 SOC 控制在一定范围内（如 30%~80%），起到防止对动力电池过充电或过放电的作用，从而保证动力电池的正常使用，延长动力电池的使用寿命。

2) 提高整车性能。在没有提供准确 SOC 值的情况下，为保证动力电池的安全使用，整车控制策略需保守地使用动力电池，防止动力电池出现过充电和过放电情况。这样不能充分发挥动力电池的性能，降低了整车的性能。

3) 降低对动力电池的要求。在准确估算 SOC 的前提下，动力电池的性能可被充分利用。选用动力电池时，针对动力电池性能设计的余量可大大减小。例如，在准确估算 SOC 的前提下，只需使用容量为 20A·h 的动力电池组。如果不能提供准确的 SOC 值，为保证整车的性能和可靠性，可能需选择 30A·h 甚至更高容量的动力电池组。

4) 提高经济性。选择较低容量的动力电池组可降低整车的制造成本。同时，由于提高了系统的可靠性，后期的维护成本也大大降低。

7.5.2 动力电池 SOC 的评估方法

(1) 电荷累积法

电荷累积法（Coulomb counting Method，也称 CC 法）又称容量积分法，是预先知道上一时刻动力电池剩余电量状态，并对一段时间内动力电池充入、放出的电荷进行统计，从而得到当前动力电池 SOC 的一种方法。

假设上一时刻 t_1 动力电池的剩余电量为 Q_{t_1} ，当前时刻 t_2 动力电池的剩余电量为 Q_{t_2} ，从 t_1 到 t_2 期间动力电池充入、放出的累计电量为：

$$Q_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (7-5-1)$$

那么



$$Q_{t_2} = Q_{t_1} - Q_{t_1}^{t_2} \quad (7-5-2)$$

式 (7-5-1) 中, $i(t)$ 可取正也可取负。当 $i(t) > 0$ 时, 表示动力电池在放电, 当 $i(t) < 0$ 时, 表示动力电池在充电。

同理, 在式 (7-5-2) 中, 若 $Q_{t_1}^{t_2} > 0$, 则表示在 t_1 到 t_2 这段时间内, 总体而言动力电池放出电量多于充入电量。反之, 若 $Q_{t_1}^{t_2} < 0$, 则表示在 t_1 到 t_2 这段时间内, 总体而言动力电池充入的电量多于放出的电量。

通过式 (7-5-2) 求得 Q_{t_2} 后, 可进一步通过比例运算求得此时的 SOC 值 (%)。

然而, 电荷累积法存在以下 3 个问题:

1) 对初始值的依赖性。事实上, 电荷累积法只能解决一段时间内电量变化的情况 $Q_{t_1}^{t_2}$, 而我们最终关心的是动力电池的剩余电量 Q_{t_2} , 这依赖于 Q_{t_1} 的准确性。若初始值 Q_{t_1} 存在误差, 则没有办法对其进行修正。

2) 累积误差的问题。由于电流传感器精度不足、采样频率低、信号易受干扰等原因, 用于积分的电流 $i(t)$ 与真实值相比存在一定误差, 多次循环后会出现一些误差积累。目前的校正方法大多利用动力电池组电压来校正因电流积分导致的累积误差。通过动力电池组放电到放电终止电压时, 无论 SOC 值为多少都置为 0, 这样可避免长时间积分的累积误差。可在动力电池组静态时采用电压法来校正 SOC, 而在工作时用电流积分的方法。然而, 电压和容量存在对应关系, 受到温度和放电电流大小的影响, 且动力电池组的电压与容量存在对应关系, 受动力电池组均衡性的影响较大, 因此仅通过电压校正的方法也需做进一步改进。另一种较为有效的校正方法就是把动力电池充至饱满, 或将动力电池的剩余电量全部放光。当然, 这种方法会减少动力电池的循环使用寿命, 实用性不强。

3) 不能应对动力电池的自放电问题。几乎所有二次电池都存在自放电问题, 即其内部电荷以极慢的速度放出。电荷累积法对这种现象几乎是无能为力的, 原因如下:

➤ 自放电的等效电流很小, 一般的电流传感器无法准确测量。

➤ 相当一部分自放电电流并不走工作电流的回路, 设置在工作电流回路中的传感器自然检测不到自放电电流。

➤ 自放电可能发生在动力电池管理系统不工作的情况下, 例如车辆“熄火”后静置在车库里, 此时 BMS 并不需工作, 自然也无法监测动力电池的自放电情况。

除上述 3 个方面外, 使用电荷累积法还要注意其他一些细节。例如要求 BMS 关闭时需记录最后时刻的剩余电量 Q_{t_1} , 否则第二天驾驶人重新启动电动车辆时, 电量评估就会缺少初始值。另外, 在更换动力电池组后, 必须对动力电池剩余电量进行一次校正, 这可通过对动力电池组进行一次饱充来进行。

(2) 开路电压法

开路电压法 (Open-Circuit Voltage method, 简称 OCV 法), 就是当电池既不处于充电状态, 也不处于放电状态, 即工作电流为零的情况下, 通过测量动力电池的开路电压 (OCV) 来估算动力电池的 SOC。使用开路电压法一般基于以下 3 个前提:

1) SOC 与动力电池的电动势 (EMF) 有一一对应关系, 即给出 0 ~ 100% 之间的任意一个 SOC 值, 存在唯一的一个电动势 (EMF) 值与之对应。

2) 在工作电流为零的情况下, 开路电压 (OCV) 与动力电池电动势 (EMF) 相等。



3) 不考虑温度及老化程度等因素,即认为在不同的温度条件下,不同老化程度的动力电池具有相同的 SOC-EMF 曲线。

由动力电池的工作特性可知,动力电池组的开路电压和动力电池的剩余容量存在一定的对应关系。随着放电动动力电池容量的增加,动力电池的开路电压降低。由此可根据一定充放电倍率时动力电池组的开路电压和 SOC 的对应曲线,通过测量动力电池组开路电压的大小,插值估算出动力电池 SOC 的值。在电动车辆的应用实践中,OCV 法通常利用工作电流为零的时机,测量动力电池电压 U_0 ,然后反求出动力电池的 SOC 值。

OCV 方法简单易行,但不同充放电倍率时动力电池组的电压不一致,因此在电流波动比较大的场合,这种计量方式会失去意义。在电动车辆的具体应用中,开路电压法存在以下不足:

1) 关于工作电流为零的问题。由于开路电压法是基于工作电流为零的情况进行的,而在电动车辆的行驶过程或充电过程中,即工作电流不为零的情况下,也需知道 SOC 的值,这时开路电压法显然是不适用的。此外,即使电动车辆不起动、不充电,处于静止状态,也不能认为动力电池的工作电流为零,因为此时车辆的弱电系统仍在工作,例如整车控制器没有关闭、通信网络仍处于工作状态、仪表板可能开启等,至少此时 BMS 本身仍在工作,这些都意味着电动车辆的工作电流不一定为零。在实际应用中,可设定一个电流的门限值,当电流小于该门限值时认为可通过 OCV 法评估 SOC。

2) EMF-SOC 曲线的获取和利用。动力电池电压的滞回特性对用 OCV 方法表示 EMF 会产生很大影响。虽然在电压平台区动力电池的充放电平衡电动势相差不过十几毫伏,但 SOC 从 90% 降到 10% 的这一平台区内,整个电压降也不会超过 200mV,因此若忽略滞回特性,则所评估的 SOC 值可能存在 10% 左右的误差。在实际应用过程中,由于用户更关注动力电池在放电过程中的 SOC 值,可选择放电时的 EMF-SSO 曲线作为 SOC 评估的标准。但电动车辆使用过程中存在能量回馈制动、不同动力电池间的均衡控制等问题,可能造成放电与充电交替的情况,因此滞回特性对开路电压法的影响只能减小,不能克服。另外,不同温度对动力电池组的放电平台电压影响也较大,因此单靠电压来估算 SOC 难以满足实际需求。

3) 电压回弹问题。开路电压法必须考虑动力电池电压的回弹效应。当电动车辆因某些原因(如等待交通信号灯)短暂停车时,是否可用开路电压法对 SOC 做一次评估也是需要考虑的问题。如果停留时间过短,电压还没有回弹到稳定状态,则估算出的 SOC 值必然偏小,且误差的大小与停留的时间有关。针对电压回弹问题通常有如下两种解决办法:

① 设定一个时间阈值,当工作电流持续小于电流门限值的时间大于时间阈值时,才用开路电压法对 SOC 值做评估。

② 利用动力电池模型,通过 10 ~ 30s 内电压回弹的趋势来预估动力电池电压回弹的极限值,再用该极限值来估算 SOC 值。

综上所述,开路电压法对单体动力电池的估计要优于动力电池组,当动力电池组中出现单体动力电池不均衡问题时,会导致动力电池组的容量低时电压很高,因此该方法不适合个体差异大的动力电池组。开路电压法在动力电池正常工作时不能使用,需等到动力电池停止工作一段时间后才能使用。

(3) 折中的方法

由于电荷累积法和开路电压法的特点存在明显的互补性,有学者又提出一种折中方法:



当动力电池处于工作状态（工作电流大于设定的门限值）时，用电荷累积法实时更新 SOC 值。同时，为消除电荷累积法的累积误差，并解决电荷累积法的初始 SOC 评估问题，在动力电池系统每次启动时，或动力电池组存在短暂不工作的时期，利用开路电压法对 SOC 进行校准。

该方法能在一定程度上弥补电荷累积法存在的不足，如每隔一段时间消除累积误差，解决了动力电池长期静置不用后 SOC 的初值问题、自放电问题等。同时，该方法也解决了电荷累积法无法在动力电池组正常工作时估算 SOC 值的问题。

这种折中的方法在实际 BMS 系统中得到了广泛应用。但该方法并不能解决开路电压法本身所存在的不足，例如电流为零问题、电压滞回效应以及 EMF 受温度和使用历史影响等问题。因此，对 SOC 评估算法的改进依然是一个值得研究的课题。

7.5.3 动力电池 SOC 评估的难点

动力电池一致性指同一规格型号的单体动力电池组成动力电池组后，其电压、荷电量、容量及衰退率、内阻及其变化率、寿命、温度影响、自放电率等参数存在一定差别。根据使用中动力电池组不一致性扩大的原因和对动力电池组性能的影响方式，可把动力电池的一致性分为容量一致性、电压一致性和电阻一致性。

（1）动力电池状态监测不准确对评估造成的困难

剩余电量并非一个可直接测量的值，而需通过电压、电流等状态量的测量值来进行间接估算。动力电池状态监测环节的误差是不可避免的，因此动力电池剩余电量评估的误差也是不可避免的。动力电池状态监测的不准确性主要表现在两个方面：由传感器精度引起的状态监测不准确，以及由电磁干扰引起的状态监测不准确。

（2）动力电池不一致性对评估造成的困难

制造过程中，由于材料、工艺等各方面的差异，导致不同批次的动力电池之间，甚至同一批次的不同动力电池之间存在较大的差异性，这样的差异给动力电池剩余容量的评估造成了一定困难。原因主要在于以下两个方面：

1) 样本与实际的不一致。目前的剩余电量评估算法，基本都基于动力电池样本特性，以样本特性来类比实际工作中动力电池的特性。因此，样本动力电池与实际动力电池的不一致性，会影响电量评估的精度。以下是两种常见的情况：

① 采用电荷累积法评估动力电池的剩余电量，其容量非一致性会导致评估不准。例如样本动力电池的容量是 $100\text{A} \cdot \text{h}$ ，而实际动力电池的容量为 $105\text{A} \cdot \text{h}$ 。那么，当用 CC 方法算得某次实际过程中累计放出的电量为 $95\text{A} \cdot \text{h}$ 时，根据样本容量，剩余电量应为 $5\text{A} \cdot \text{h}$ ，而实际动力电池的剩余容量是 $10\text{A} \cdot \text{h}$ 。

② 采用开路电压法评估 SOC，其依据为动力电池样本的 SOC-EMF 曲线，即根据测量实际动力电池的开路电压，通过曲线反求实际动力电池的 SOC 值。然而，由于实际动力电池与样本动力电池的特性曲线的不一致性，用 OCV 法评估得到的 SOC 值会存在误差。动力电池静态（动力电池静止 1h 以上）开路电压在一定程度上是其 SOC 的集中表现。由于动力电池 SOC 在一定范围内还与其开路电压呈线性关系，开路电压的不一致性也在一定程度上体现了动力电池能量状态的不一致性。

2) 动力电池组内各单体动力电池不一致。在实际工作中，有以下 3 种情况值得注意：



① 动力电池生产制造过程导致的不一致是动力电池不一致的直接原因。在制造过程中,由于工艺上的问题和材质的不均匀,使动力电池极板活性物质的活化程度和厚度、微孔率、连条、隔板等存在微小差别,这种动力电池内部结构和材质上的不一致性,就会使同一批次出厂的同一型号动力电池的容量、内阻等参数不完全一致。另外,如果对每个单体动力电池都进行较精密的电压采样,则需要的器件费用较昂贵。为解决这两个矛盾,有些动力电池管理系统中仅对整个动力电池组内的若干个单体动力电池进行采样,从而推算出整个动力电池组的剩余电量。这种做法极大节约了动力电池剩余容量的评估计算时间和器件成本。然而,由于组内单体动力电池存在一定不一致性,其评估结果难免存在一定误差。

② 工作环境是导致动力电池不一致现象的间接原因。在电动车辆的工作过程中,受动力电池组中各单体动力电池的温度、通风条件、自放电程度、电解液密度等差别的影响,在一定程度上增加的动力电池电压、内阻及容量等参数存在不一致性。单体动力电池在动力电池箱内的位置存在差异,各单体动力电池的吸热、散热状况不一致,而温度又会对动力电池的剩余电量乃至循环寿命产生较大影响。因此在某一时刻,动力电池组内单体动力电池的剩余容量、健康状况都存在一定差异。如果用统一的方法对剩余容量进行评估,则会造成较大误差。

一般地,动力电池组放电 40%~50% 时,处于放电电压平稳阶段,因此动力电池电压一致性良好。在放电后期,车辆停止行驶是因为极少数单体动力电池电压偏低,达到甚至超过单体动力电池放电终止电压。在此情况下,最高与最低动力电池单体电压差可达 0.5V 以上。若继续使动力电池组放电,则电压较低的单体动力电池会因没有能量可放出而过放电,产生永久性损坏。

由于各动力电池单体间的不一致性和串联动力电池组的短板效应,在使用过程中,动力电池组的最大可用容量与单体动力电池的可用容量下降速度不同步,这也会导致各单体动力电池的 SOC 状态不相同,使动力电池组寿命和动力电池单体相比明显降低。过充电或过放电都会对动力电池造成额外损伤,致使动力电池的容量衰减加剧。此时的动力电池组寿命降低更加明显。

③ 个别动力电池替换后也容易产生不一致现象。电动车辆动力电池组在使用一段时间后,有时需对个别性能特别差的单体动力电池进行替换,替换后,新单体动力电池与组内其他单体动力电池的不一致使 SOC 的评估更加困难。

电压不一致的主要影响因素在于并联组中动力电池的互充电。当并联组中一个单体动力电池电压低时,其他单体动力电池会给此单体动力电池充电。这样,低压动力电池容量小幅增加,同时高压动力电池容量急剧降低,能量将损耗在互充电过程中,使对外输出达不到预期。若低压动力电池和正常动力电池一起使用,则会成为动力电池组的负载,影响其他动力电池的工作,进而影响整个动力电池组的寿命。因此,在动力电池组不一致性明显增加的深放电阶段,不能再继续行车,否则会造成低容量动力电池过放电,影响动力电池组使用寿命。

(3) 运行工况的不确定性对评估造成的困难

在电动车辆工作过程中,可能的工况是千变万化的。驾驶人无法预知下一时刻的工作状况,这给剩余电量或 SOC 的评估造成了如下的困难:

1) 受多种因素影响,剩余电量并不能完全释放。例如在实际工作中,若未来时刻需要



放出的工作电流较大,则动力电池组实际可放出的电荷较少。反之,若未来电动车辆所需的工作电流较小,且工况稳定,则动力电池组实际可放出的电荷较多。除工作电流外,动力电池组的工作温度也会对动力电池可释放的最大电荷量产生影响。

2) 在剩余电量一定的前提下,动力电池组实际可放出的能量是不一样的。定性的情况是动力电池工作温度不变,内阻维持不变,工作电流越大,动力电池组可放出的能量就越少,电动车辆的续航里程就越短。同时,若动力电池的工作电流一定,工作温度越高,内阻越小,动力电池组可放出的能量就越多,续航里程也越长。

7.5.4 提高动力电池一致性的措施

由前文可知,动力电池组的一致性相对的,不一致性是绝对的。为提高动力电池组的利用效率和性价比,在应用过程中,需采取一定措施,减缓动力电池不一致性扩大的趋势或速度。根据动力电池应用经验和试验研究,常采用如下措施,保证动力电池组寿命逐步趋于单体动力电池的使用寿命:

1) 提高动力电池制造工艺水平,保证其出厂质量,尤其是初始电压的一致性。同一批次动力电池出厂前,以电压、内阻及动力电池化成数据为标准进行参数相关性分析,筛选相关性良好的动力电池,以此来保证同批动力电池的性能尽可能一致。

2) 在动力电池成组时,务必保证动力电池组采用同一类型、同一规格、同一型号的动力电池。

3) 在动力电池组使用过程中检测单体动力电池参数,尤其是动、静态情况下(车辆停放或行驶过程中)的电压分布情况。掌握动力电池组中单体动力电池不一致性的发展规律,对极端参数单体动力电池及时进行调整或更换,以保证动力电池组参数不一致性不随使用时间增长而增大。

4) 对使用中发现的容量偏低的单体动力电池进行单独维护性充电,使其性能恢复。

5) 间隔一定时间对动力电池组进行小电流维护性充电,促进动力电池组自身的均衡和性能恢复。

6) 尽量避免动力电池过充电,尽量防止动力电池深度放电。

7) 保证动力电池组良好的使用环境,尽量保证动力电池组温度场均匀,减小振动,避免水、尘土等污染动力电池极柱。

8) 采用动力电池组均衡系统,对动力电池组充放电进行智能管理。

7.6 动力电池组的匹配设计

7.6.1 电动车辆能耗经济性评价参数

动力电池组是电动车辆的重要能量来源,是纯电动车辆的唯一能量来源。在车辆与动力电池系统的匹配中,首先要关注并了解电动车辆的能耗评价指标。

能耗经济性是车辆的主要使用性能之一,可定义为车辆在一定使用工况下,以最小能量消耗完成单位运输工作的能力。在内燃机汽车上称为燃料经济性,在电动车辆上以电能消耗为指标。车辆能耗经济性常用的评价参数都是以一定的车速或循环行驶工况为基础,以车辆



行驶一定里程的能量消耗量或一定能量可使车辆行驶的里程来衡量的。为使电动车辆能耗经济性评价指标具有普遍性，可适用于不同类型的电动车辆，其评价指标应满足以下 3 个条件：

- 可比性：可对不同类型的电动车辆经济性进行比较。
- 独立性：指标参数值与整车储存能量总量无关。
- 直观性：可直接从参数指标进行能耗经济性判断。

(1) 续驶里程

续驶里程是纯电动汽车动力电池组充满电后可连续行驶的里程，可分为等速续驶里程和循环工况续驶里程。等速情况通常以 40km/h 或 60km/h 作为标准。循环工况则根据车辆的使用环境进行选择，常用的包括欧洲 15 工况、日本 10 工况、中国客车 6 工况等。这项指标对综合评价电动车辆动力电池组、电机、传动系统效率及电动车辆实用性具有积极意义。但该指标与电动车辆动力电池组装车容量及电压水平有关，因此在不同车型和装配不同容量动力电池组的同种车型间不具有可比性。即使装配相同容量同种动力电池的同一车型，续驶里程也受到动力电池组状态、天气、环境因素等使用条件影响，而有一定幅度的波动。

续驶里程还可分为理论续驶里程、有效续驶里程和经济续驶里程，见表 7-6-1。

表 7-6-1 续驶里程的 3 种表达方式

表 达 方 式	定 义	放 电 深 度
理论续驶里程	根据动力电池组能量存储理论值和车辆单位里程能量消耗理论值计算所得的续驶里程	指充放电深度均为 100% 情况下电动车辆可行驶的里程
有效续驶里程	是保证经济性和实用性，使动力电池组能可靠稳定工作前提下的续驶里程	指放电深度 70% ~ 80% 时车辆的可行驶里程
经济续驶里程	最大限度保证动力电池组使用经济性和使用寿命，有利于动力电池组在最佳状态下工作的续驶里程	指充电至 SOC 为 90%，放电深度不超过 90% 时的车辆可行驶里程

在经济续驶里程的充放电机制下，可最大限度保证动力电池组稳定可靠工作，减少动力电池组不一致性对整个动力电池组系统工作的影响，提高动力电池组寿命。动力电池的充放电效率越高，电动车辆运行的总体能耗经济性越好。

(2) 单位里程容量消耗

动力电池及动力电池组以容量作为能量存储能力的标准之一。以动力电池组作为唯一动力源的纯电动汽车单位里程的容量消耗，定义为车辆行驶单位里程消耗的动力电池组容量。

动力电池组放电深度不同时，总电压有明显变化，因此在相同放电功率下动力电池组放电电流有相应变化。在相同车辆使用条件下，动力电池组放电深度不同，单位里程消耗的动力电池组容量不同。单位里程容量消耗作为经济性评价参数存在一定的误差。因此单位里程容量消耗指标参数值的获得必须以多次不同条件下行驶试验为基础，取试验结果的平均值。基于上述特点，这项指标在不同的使用条件下，不同车型间不具有可比性。仅适用于电压等级相同，车型相似情况下能耗经济性的比较，或同一车型能耗水平随动力电池组寿命变化历程的分析。



(3) 单位里程能量消耗

单位里程能量消耗又可分为单位里程电网交流电量消耗和单位里程动力电池组直流电量消耗。其中，交流电量消耗受到不同类型充电设备效率的影响，有一定误差。此外，充电设备是独立于电动车辆的服务性设备，不应作为电动车辆效率评价的一部分。在使用不同充电设备的情况下，电动车辆的经济性在一定程度上不具有可比性。单位里程动力电池组直流电消耗量，仅以车载动力电池组的能量状态作为标准，脱离了充电机的影响，因此可直接、可靠地反映电动车辆的实际经济性能。

(4) 单位容量消耗行驶里程和单位能量消耗行驶里程

这两种电动车辆能耗经济性的评价指标分别是单位里程容量消耗和单位里程能量消耗的倒数，单位分别为 $\text{km}/(\text{A} \cdot \text{h})$ ， $\text{km}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(5) 等速能耗经济特性

等速能耗经济特性指车辆在额定载荷下，在最高档、水平良好路面上以等速行驶单位里程的能耗或单位能量行驶的里程。通常可测出每隔 5km/h 或 10km/h 速度间隔的等速行驶能耗量，然后在速度—能耗曲线图上连成曲线，这称为等速能耗经济特性。该曲线可确定车辆的经济车速。但这种评价方法不能反映车辆实际行驶中受工况变化的影响，特别是市区行驶中频繁加减速的行驶工况。

(6) 比能耗

电动车辆不同车型的总质量相差很大，跨度从几百千克到十余吨，因此单位里程能量消耗也有很大差别。为进行不同车型间的能耗水平分析和比较，引入直流比能耗的概念，即单位质量在单位里程上的能量消耗，单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{km} \cdot \text{t})$ 。该参数可体现不同车型间的传动系统匹配优化程度和能量利用效果。以直流比能耗作为电动车辆能耗经济性的评价标准，可直观评价各种不同车型的能耗水平，可比性强。目前主流汽车企业研制的电动车辆直流比能耗在 $40 \sim 80\text{W} \cdot \text{h}/(\text{km} \cdot \text{t})$ 。

在电压等级相同的情况下，与比能耗指标评价类似，可引入比容耗的概念，即单位质量在单位里程的容量消耗，单位为 $\text{A} \cdot \text{h}/(\text{km} \cdot \text{t})$ 。

纯电动汽车能耗经济性评价的各参数间存在相互转换的计算关系，如图 7-6-1 所示。动力电池组可放出的有效能量、有效容量、单位里程能耗及单位里程容耗是电动车辆续驶里程的决定性因素。车辆的整备质量把单位里程能耗、容耗与比能耗、比容耗联系起来。单位里程能耗、容耗与单位能量、容量行驶里程之间的倒数关系，说明这两个参数只是同一概念的不同表达方式。单位里程容耗和能耗的区别在于计算中是否考虑动力电池组电压变化的影响。

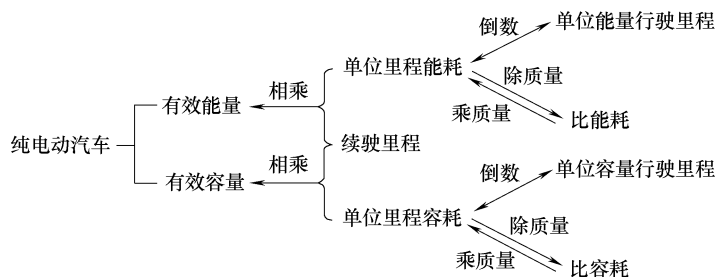


图 7-6-1 纯电动汽车能耗参数关系



7.6.2 动力电池组的功能要求

动力电池组是动力电池系统在电动车辆上安装的基本单元。对整车而言,动力电池组的结构直接关系到整车的布置和安装。动力电池组的内部尺寸决定了单体动力电池的布置和结构形式。对电动车辆的能源供应商而言,动力电池组的安装固定形式直接决定了动力电池能量补给的方式(充电、更换或充换兼容)。因此,动力电池组的结构和功能受到电动车辆整车及部件设计者、能源供应商、使用者的普遍关注。

总体而言,对动力电池组的要求应包括满足车辆应用需要的电气性能要求,以及防水、防尘、防火、防震、对车体绝缘等防护功能。

(1) 电气性能

1) 电压。动力电池组由各单体动力电池通过串、并联形式构成,要求各支路单体动力电池电压的总和为电动车辆驱动系统要求的电压。

2) 能量。动力电池组的比能量有别于动力电池单体,在计算动力电池组的比能量时需包含动力电池箱、动力电池管理系统、动力电池间的连接件等辅助部件。因此,动力电池组的比能量(质量比能量和体积比能量)应低于单体动力电池的比能量,且比能量与单体动力电池比能量越接近,说明动力电池组的总体设计越合理,轻量化越好。

3) 温控能力。动力电池组内应具有动力电池冷却、加热、保温等部件构成的动力电池热管理系统,具备控制动力电池组内温度在适宜动力电池工作温度范围内的能力。

(2) 机械强度

动力电池组在电动车辆上安装应用,必须满足车辆部件的耐振动、耐冲击、耐跌落、耐盐雾等强度要求,保证可靠应用。

(3) 安全要求

1) IP 防护等级。为满足防水、防尘要求,动力电池组应满足一定的 IP 防护等级,根据车辆的总体要求,对动力电池组,一般的 IP 防护等级要求不低于 IP55。

2) 电气绝缘性能。现阶段动力电池组外壳多采用金属材料制成,动力电池组正极和负极与金属外壳之间的绝缘电阻应大于 $10\text{M}\Omega$ 。

3) 电气保护功能。在极端工况下,通过动力电池管理系统实现动力电池组的高压断电保护、过流断开保护、过放电保护、过充电保护等功能。

(4) 接口与通信协议

动力电池组具有对外电能输出能力,需与电动车辆的用电设备进行连接和通信。相应的电气接口和机械接口在满足安全性、可靠性的前提下,需满足国家和行业相关标准要求。

7.6.3 动力电池梯次利用与回收

(1) 动力电池梯次利用

动力电池梯次利用指在动力电池不能满足现有电动车辆的功率和能量需求时,继续将其转移应用到对动力电池能量密度、功率密度要求低一个等级的其他领域,通过动力电池在不同性能需求领域的传递使用,实现动力电池性能充分利用和在动态应用中报废,以降低动力电池使用成本的目标。例如,城市电动公交客车、市政电动特种用途车以及遍布全国各地的



风景旅游区用电动观光车对整车续驶里程、加速性能、最高车速等要求的差异,导致了在动力电池组配备上对储能容量、功率需求呈现递减梯度。在前一种应用形态下,动力电池经过一定的充放电循环后,容量衰退到本梯次应用的最小容忍值,可转移作下一梯次电动车辆的动力源。以 $100\text{ A}\cdot\text{h}$ 锂离子动力电池单体为例,可将应用梯次依据容量划分为 4 个梯次,见表 7-6-2。

表 7-6-2 电动车辆梯次划分 (按动力电池使用容量)

梯次 项目	1	2	3	4
电池容量/ $\text{A}\cdot\text{h}$	80 ~ 100	60 ~ 80	40 ~ 60	< 40
适用车型	大型公交客车、 高速电动汽车	城市特殊用途车、 市政用车等	低速电动微型车、 旅游观光车	电站 UPS 储能

动力电池梯次利用理论研究处于起步阶段,其关键技术如下:

- 动力电池梯次分类的判定技术。
- 应用于多级转运的动力电池组的模块化。
- 标准化设计技术。
- 在管理上梯次利用供应链的形成机制。

2016 年底,我国工信部发布动力电池回收利用管理办法征求意见稿,落实生产者责任延伸制度,汽车生产企业承担动力电池回收利用主体责任。工信部同有关部门研究制定财税优惠、产业基金、积分管理等激励政策,研究探索动力电池残值交易等市场化模式,促进动力电池回收利用。预计到 2020 年,我国电动汽车动力电池累计报废量将达到 12 万 ~ 17 万 t,潜在市场空间较大。同时,随着锂电原材料价格的上涨,锂电回收已具备较强经济性,有利于相关公司进行业务布局。

(2) 动力电池回收

动力电池回收指动力电池在功率和能量方面均完全失去使用价值之后,通过一定途径由相关机构或企业收集,并采用化学或物理方法分离出各种有利用价值的元素,减少或消除对环境带来的负面影响的行为。

世界上一些大型汽车公司针对特定市场开展了动力电池的回收处理工作。日本丰田 (Toyota) 汽车公司生产的普锐斯 (Prius) 混合动力汽车,采用的是镍氢电池,其回收处理模式已经基本形成。丰田在欧洲已经建立了动力电池回收处理网络,动力电池回收工作相当规范。

部分发达国家也开展了一些有关动力电池回收处理的研究工作,如美国能源部从 1990 年开始立法要求回收电动车辆电池,美国三大汽车公司已经开始联合研发镍氢电池和锂电池回收处理技术,阿岗实验室也一直在开展电动车辆电池回收的研究工作。

7.7 国内外产品及主要厂家

目前,全球锂电池的主要生产国为中国、日本及韩国。凭借产业优势和技术积累,松下、LG 化学、三星 SDI 成为当今锂电池领域的三大巨头。据统计,2017 年一季度全球动力



电池出货量 $5273\text{MW} \cdot \text{h}$ ，其中三巨头总计占比达 62%。松下采用高镍三元路线，封装以圆柱形为主，其圆柱形电池能量密度世界领先，与特斯拉保持良好的合作关系，是动力电池行业的领导者。LG 化学起步稍晚，动力电池正极主要是三元 NCM（镍钴锰酸锂），是国际公认的软包龙头，拥有众多优质客户，包括现代、通用、雷诺、日产等，是动力电池行业的后起之秀。三星长期立足消费类锂电的研发生产，技术积累深厚，以发展大容量方形硬壳电池为主。近年来，国内 CATL、比亚迪、国轩等企业也相继完成了各自技术路线的初步探索，在产能规模上成为日韩动力电池巨头有力的挑战者。

7.7.1 国外产品及厂家

(1) 松下锂电池

松下电器产业株式会社创建于 1918 年，于 1994 年开始研发可充电锂电池。1998 年松下开始量产笔记本电脑专用的圆柱形锂电池，并建成了业内领先的锂离子电池生产线。2008 年 11 月，松下宣布与三洋电机合并，一跃成为全球最大的锂电池供应商。随着新能源汽车的兴起，松下动力电池业务营业收入快速增长，2016 年达 18 亿美元，同比增长约 50%，2016 年动力电池出货量约为 $9.8\text{GW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 56%。2008 年，松下与特斯拉首次展开合作，18650 钴酸锂电池被特斯拉首款车型 Roadster 采用。自此，松下与特斯拉一直保持良好的合作关系，成为特斯拉最主要的动力电池供应商。2014 年，松下宣布与特斯拉合资共建超级电池工厂 Gigafactory，两者关系更进一步。除特斯拉外，松下与大众、福特等诸多厂商也存在合作关系，其客户分布在欧美。

松下动力电池正极使用高镍三元材料，电芯封装以圆柱形为主。圆柱的优点包括生产工艺成熟，产品良率高，有如 18650、21700 等统一规格型号，整体成本有优势。同时，其缺点也比较明显，圆柱形电池一般采用钢壳或铝壳封装，重量较大，比能量相对较低。目前，松下绝大部分动力电池供给特斯拉。Model S 和 Model X 使用的是 18650 圆柱形动力电池，最新一代 18650 电池正极采用 NCA 材料（氢氧化镍），负极使用硅碳复合材料，单体能量密度可达 $250\text{W} \cdot \text{h/kg}$ 。Model 3 使用的 21700 圆柱形电池，单体能量密度提高到 $340\text{W} \cdot \text{h/kg}$ ，是目前市面上单体能量密度最高的动力电池。

松下动力电池工厂主要分布在日本、美国、中国。目前，Model 3 和 Model X 的动力电池均在日本工厂生产。Gigafactory 工厂生产的是圆柱形 21700 电芯，该电芯用在特斯拉能源存储产品和 Model 3 轿车中。2017 年 1 月 5 日，特斯拉表示，Gigafactory 工厂已开始批量生产锂离子电池。此外，松下在中国大连和苏州各建立了一个工厂，大连工厂生产方形电池，计划完全建成后动力电池产能可满足 20 万辆电动车的需求，目前一期工程已投产。苏州工厂为松下与苏州捷新的合资工厂，生产 18650 圆柱形电池，预计 2017 年下半年投产，2017 年产能可达 1 亿支。

(2) 东芝钛酸锂电池

东芝的钛酸锂电池负极材料采用钛酸锂（LTO）。东芝在 2007 年就宣布，其开发的锂电池通过采用基于钛酸锂（ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ）的负极材料，获得了与此前产品不同的特性。东芝动力锂电池以高安全性为基础，除充放电寿命高、具有出色的低温特性外，还具有可大量获得充放电深度、输出功率高的特点。另外，东芝动力锂电池快速充电时，所需时间极短，仅 5min 左右即可，这些优点大都源于其开发的负极材料。



东芝的钛酸锂电池包括了功率型电池 $2.9\text{A} \cdot \text{h}$ 、 $10\text{A} \cdot \text{h}$ 和能量型电池 $20\text{A} \cdot \text{h}$ 、 $23\text{A} \cdot \text{h}$ 。其中， $2.9\text{A} \cdot \text{h}$ 电池在 35°C 时，SOC 范围 20%~80% 的条件下，10C 充电/10C 放电的循环寿命高达 40000 次以上。 $10\text{A} \cdot \text{h}$ 电池在 5C 充电/5C 放电条件下，循环 20000 次后容量保持率还在 90% 以上。 $20\text{A} \cdot \text{h}$ 电池在 3C 的充放电电流下，循环寿命可保持在 15000 次以上（容量保持率 >80%）。该公司目前正在积极开发以 $150\text{W} \cdot \text{h/kg}$ 能量密度为目标的单元。

（3）LG 动力锂电池

1998 年，LG 化学正式开始研发锂离子电池，凭借自身数十年材料生产研发经验，LG 化学在开发锂电池的时候有产业链协同的优势，可将正负极材料、隔离膜等方面独到的技术，第一时间导入到它的产品设计中。目前，LG 化学可从 Cell、模块、BMS、Pack 开发到技术支持，提供与动力电池相关的全部产品组合。LG 化学 2016 年动力电池出货量达到 $7.3\text{GW} \cdot \text{h}$ 。

2009 年，LG 化学正式进入动力电池市场，与韩国现代起亚合作，首次将锂电池产品应用于商用混合动力汽车。此后，LG 化学先后和通用、雷诺、福特、沃尔沃等国际厂商展开合作，成为动力电池三大供应厂商之一。LG 化学赢得了包括通用、福特、沃尔沃、现代、起亚、雷诺、中国长安在内的多家厂商的供货合同。2012 年，LG 化学在韩国和美国密西根州设厂，保证福特电动汽车的产量。预计到 2020 年，LG 化学在车用动力电池市场占有率将达到 25%。

在技术上，LG 化学正极采用的主要是三元 NCM 材料。在包装方面，LG 化学大部分采用叠片式软包设计。软包锂电池所用的关键材料——正极材料、负极材料及隔膜——与传统的钢壳、铝壳锂电池之间区别不大。软包电池独特的包装材料和结构使其拥有一系列优势：①安全性能好，软包电池在结构上采用铝塑膜包装，发生安全问题时，软包电池一般会鼓气裂开，不会爆炸；②重量轻，软包电池重量较同等容量的钢壳锂电池轻 40%，较铝壳锂电池轻 20%；③内阻小，软包电池的内阻较其他锂电池小，可极大降低自耗电；④循环性能好，软包电池的循环寿命更长，100 次循环衰减比铝壳锂电池少 4%~7%；⑤设计灵活，软包电池外形可变任意形状，可根据客户需求定制，开发新的电芯型号。软包电池的不足之处是一致性较差，成本较高，容易发生漏液，技术门槛高。

LG 化学在韩国、美国、欧洲和中国均设有动力电池工厂。4 个动力电池生产基地分别位于中国南京、韩国吴仓、美国霍兰德和波兰弗罗茨瓦夫。LG 化学计划将汽车动力电池的产能，从 2016 年满足全球 5 万辆电动汽车，增加到 2020 年满足 20 万辆电动汽车，即增长到原来的 4 倍。

（4）三星 SDI 电池

2000 年，三星 SDI 开始进军动力电池领域。2015 年 5 月，三星 SDI 全资收购 MagnaSteyr 从事电池业务的子公司 MSBS（Magna Steyr Battery Systems GmbH&Co OG）。从此，三星 SDI 构建起从电池单元、模块到电池组的完整电动汽车电池业务体系。在全球小型消费锂电池市场中，三星 SDI 独占鳌头。但在动力电池领域，相比松下和 LG 化学，三星 SDI 无论营业收入还是动力电池出货量都稍逊一筹。

2008 年，三星 SDI 和博世合资成立了动力电池公司 SBLimotive。2009 年，宝马推出了纯电动汽车 Megacity，SBLimotive 成为 Megacity 动力电池供货商，这为三星 SDI 打开了动力电池市场。2014 年 7 月，三星 SDI 与宝马签订电动汽车电池扩大供货及共同开发新一代电



池材料的谅解备忘录，进一步巩固了三星 SDI 与宝马在动力电池上的伙伴关系。目前，三星 SDI 已被选为 30 多个汽车电气化项目的核心电池供应商，且项目数量在不断增加。首次安装三星 SDI 电池的汽车有菲亚特 500e（纯电动汽车），宝马 i3（纯电动汽车），宝马 i8（插电式混合动力车）以及许多 OEM 厂商的车型。

与松下、LG 化学不同，三星 SDI 动力电池封装形式以方形为主，同时积极跟进 21700 电池的生产，正极材料主要采用三元 NCM 和 NCA 材料。可生产方形硬壳大容量单体电池。此外，方形电池壳体多为铝合金、不锈钢等材料，内部采用卷绕式或叠片式工艺，对电芯的保护作用优于铝塑膜电池（即软包电池），电芯安全性相对圆柱形电池也有较大改善。方形电池的不足之处在于型号太多，工艺难以统一。

三星 SDI 的 3 个动力电池工厂分别位于中国西安、匈牙利格德和韩国蔚山，其中蔚山的工厂投产最早，当前主要为宝马 i3 和 i8 提供动力电池。

7.7.2 国内产品及厂家

(1) CATL 动力锂电池

宁德时代新能源（CATL）成立于 2011 年，总部位于福建宁德，主要研发生产电动汽车及储能系统的锂离子电池，电动汽车电池模组，电动汽车电池系统，动力总成，大型电网储能系统，智能电网储能系统，分布式家庭储能系统及电池管理系统（BMS）。

2012 年，宁德时代新能源在青海成立青海时代新能源科技有限公司，主要从事动力锂电池、储能锂电池制造和销售业务。生产基地包括福建宁德、青海西宁、江苏溧阳（在建），规划到 2020 年产能达到 50GW·h。

(2) 比亚迪动力锂电池

比亚迪锂电池的研发和生产主要集中在比亚迪锂电池有限公司，该公司是比亚迪的全资子公司。比亚迪在 2003 年就开始了车用动力锂电池的研究和开发工作。比亚迪新能源产业涉及上游矿产、电池材料（六氟磷酸锂、隔膜、电解液、正极材料）、锂电池、电动汽车领域，其动力锂电池业务主要分布在惠州、深圳、青海（在建）三个基地。比亚迪打通了上游矿产资源到下游整车全产业链，实现了产业链闭环。生产基地包括广东惠州、广东深圳、青海西宁（在建）。比亚迪公司在深圳惠州、坑梓两个动力电池生产基地，目前共有 10GW·h 的产能。

(3) 深圳沃特玛动力锂电池

深圳沃特玛成立于 2002 年，位于深圳市坪山新区。沃特玛现在主要产品为磷酸铁锂圆柱电池，目前正加强对三元锂电池的开发。生产基地包括广东深圳、山西临汾、陕西渭南、河北唐山、湖南郴州、湖北荆州、安徽铜陵、湖北十堰、河北许昌等。

(4) 合肥国轩动力锂电池

合肥国轩高科动力能源股份公司是一家专业从事新型锂电池及其材料的研发、生产和经营，拥有自主知识产权核心技术的大型高新技术企业。该公司生产的磷酸铁锂正极材料、BMS 管理系统及储能型和功率型铁锂电池等 10 多个系列产品已在新能源汽车、电动自行车、风光互补路灯、大型储能基站等战略性新兴产业领域得到广泛应用。生产基地包括安徽合肥、山东青岛、江苏昆山、江苏南京、河北唐山（在建）、四川成都（在建）等。该公司拥有 1000t/年磷酸铁锂正极材料生产线，1.25 亿 A·h/年的电芯生产线及 4 亿 kW·h/年的电池成组生产能力。



(5) 中航锂电

中航锂电（洛阳）有限公司是中航工业集团公司及所属单位共同投资组建，成飞集成控股的专业从事锂离子动力电池、电池管理系统研发及生产的高科技新能源公司。该公司的主要产品是锂离子动力电池，单体容量从 $10\text{A} \cdot \text{h}$ 到 $500\text{A} \cdot \text{h}$ ，主要应用领域包括电动车辆、电力储能、军事应用、轨道交通、矿用装备等。

(6) 苏州星恒动力锂电池

苏州星恒电源有限公司曾承担多项新能源国家项目。2004 年，星恒公司制造的高功率混合动力汽车用锂电池全面通过了“863”电动汽车重大专项组的统一测试，比功率达到 1200W/kg ，性能居国际先进水平。星恒 $10\text{A} \cdot \text{h}$ 高能量型和 $7.5\text{A} \cdot \text{h}$ 高功率型锂离子动力电池通过美国 UL 安全测试，成为中国本土第一型通过 UL 认证的锂离子动力电池，为该类电池进入国际市场铺平了道路。2009 年，星恒成为全球首家 $40\text{A} \cdot \text{h}$ 大容量磷酸铁锂电池通过美国 UL 认证的企业。

星恒动力锂电池在轨道交通领域应用较多。针对铅酸电池维护难、重污染等弊端，武汉、广州铁路局在 SS6、SS8、SS9 等车型电力机车上使用了星恒锂电池，大幅减轻了列车负重和营运维护成本，累计改造 28 列车。南京地铁车辆用后备电源，采用星恒锂电池替换原进口镍镉电池，成本不变的情况下增加使用寿命 8 年以上。京沪线高速检测列车使用星恒锂电池后，较之前减重 1.2t ，由车下悬挂安装改为车内机柜安装。

超级电容基础知识及应用技术



8.1 超级电容结构与工作原理

8.1.1 超级电容的种类

超级电容又称双电层电容器，是一种通过极化电解质来储能的电化学元件。它在储能的过程中并不发生化学反应，且储能过程是可逆的，可反复充放电数十万次。超级电容可被视为悬浮在电解质中的两个无反应活性的多孔电极板。在极板上加电，正极板吸引电解质中的负离子，负极板吸引正离子，实际上形成两个容性存储层，被分离开的正离子在负极板附近，负离子在正极板附近。与传统的电容器和二次电池相比，超级电容的比功率是二次电池的 10 倍以上，储存电荷的能力比普通电容器高，并具有充放电速度快、循环寿命长、使用温度范围宽、无污染等优点。因此，超级电容是一种非常有前途的新型绿色储能器。

超级电容的容量比同体积的电解电容大 2000 ~ 6000 倍，可大电流充放电，充放电效率高，充放电循环次数可达 100 万次，并且免维护。超级电容的出现填补了传统的静电电容器和化学电源之间的空白，以其优越的性能及广阔的应用前景受到了各国的重视。

超级电容的分类方式如下。

1) 按照电极材料分类。按照电极材料分类可分为：

➤ 以活性炭粉末、活性炭纤维、碳气凝胶、纳米碳管、网络结构活性炭为电极材料的超级电容。

➤ 以贵金属二氧化钌、氧化镍、氧化锰为电极材料的超级电容。

➤ 以聚吡咯、聚苯胺、聚对苯等聚合有机物为电极的超级电容。

2) 按工作原理不同分类。按工作原理不同，超级电容可分为双电层型超级电容和赝电容型超级电容。

双电层型超级电容的电极材料有活性炭、碳纤维、碳气凝胶和纳米碳管等，采用这些材料可制成平板型超级电容和绕卷型溶剂电容器。平板型超级电容多采用平板状和圆片状电极，也有多层叠片串联组合而成的高压超级电容，可达到 300V 以上的工作电压。绕卷型溶剂电容器的电极材料涂覆在集流体上，经过绕制得到，这类电容器通常具有比平板型超级电容更大的电容量和更高的功率密度。

赝电容型超级电容多采用金属氧化物电极材料与聚合物电极材料。既可以 NiO_x 、 MnO_2 、 V_2O_5 等金属氧化物作正极材料，活性炭作负极材料制备赝电容型超级电容，也可以 PPY、PTH、PAni、PAS、PFPT 等导电聚合物经 P 型、N 型或 P/N 型掺杂制取电极，来制备赝电



容型超级电容。这类超级电容具有非常高的能量密度。

3) 按照结构形式分类。按照结构形式分类, 超级电容可分为对称型与非对称型。

两电极组成相同且电极反应相同, 但反应方向相反, 称为对称型超级电容。两电极组成不同或反应不同, 称为非对称型超级电容。

4) 按电解质类型不同分类。按电解质类型不同, 超级电容可分为水性电解质超级电容和有机电解质超级电容。

水性电解质超级电容又可分为以下 3 种:

① 酸性电解质, 多采用 36% 的 H_2SO_4 水溶液作电解质。

② 碱性电解质, 通常采用 KOH 、 NaOH 等强碱作电解质, 水作溶剂。

③ 中性电解质, 通常采用 KCl 、 NaCl 等盐作电解质, 水作溶剂, 多用于以氧化锰作电极材料的超级电容。

有机电解质电容器通常采用以 LiClO_4 为代表的锂盐, 或以 TEABF_4 为代表的季铵盐等作电解质, 以 PC 、 ACN 、 GBL 、 THL 等有机溶剂作溶剂, 电解质在溶剂中接近饱和溶解度。

8.1.2 超级电容的结构原理

(1) 超级电容的结构与容量

常用作动力电源的超级电容是以活性炭为电极材料, 由碳电极和电解液界面上的电荷分离产生电动势的双电层电容, 其结构如图 8-1-1 所示。

超级电容单体主要由电极、电解质、集电极、隔离膜连线极柱、密封材料和排气阀等组成。

电极材料一般有碳电极材料、金属氧化物及其水合物电极材料、导电聚合物电极材料, 要求电极内阻小、导电率高、表面积大、尽量薄。

电解质需有较高导电性(内阻小)和足够电化学稳定性(提高单体电压)。电解质材料分为有机类和无机类, 或分为液态类和固态类。

集电极选用导电性能良好的金属和石墨等材料, 如泡沫镍、镍网(箔)、铝箔、钛网(箔)及碳纤维等。

隔离膜防止超级电容相邻两电极短路。为保证接触电阻较小, 应尽量薄, 通常使用多孔隔离膜, 有机电解质通常使用聚合物或纸作隔离膜, 水溶液电解质可采用玻璃纤维或陶瓷隔离膜。

电极的材料、制造技术、电解质的组成和隔离膜质量对超级电容的性能有较大影响。

超级电容的电量 q 与电压成正比。电容的计量单位为法拉(F)。给电容器施加 1V 电压, 如果其极板上存储 1F 电荷量, 则该电容器的电容量为 1F。

电容器的电容量 C 为:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (8-1-1)$$

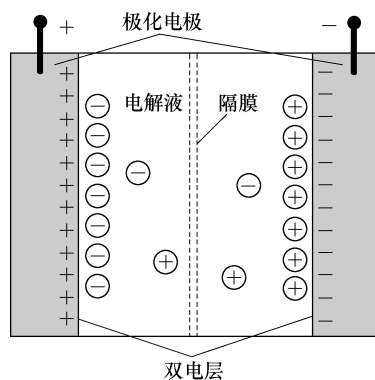


图 8-1-1 典型的双电层超级电容的基本结构



式中, ε ——电介质的介电常数, 单位为 F/m;

A ——电极表面积, 单位为 m^2 ;

d ——电容器间隙的距离, 单位为 m。

电容器的容量与电容板的面积成正比, 而与电容板的厚度无关。另外, 电容器的电容量还与电容板的间隙大小成反比。

当电容元件充电时, 其上电压增高, 电场能量增大, 电容器从电源中获得电能, 电容器存储的能量 E 为:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (8-1-2)$$

式中, U ——外加电压, 单位为 V。

当电容器放电时, 电压降低, 电场能量减小, 电容器释放能量, 可释放能量的最大值为 E 。

(2) 双电层超级电容工作原理

双电层超级电容的工作原理如图 8-1-2 所示。当电压加到超级电容的两个极板上时, 与普通电容一样, 其极板的正电极存储正电荷, 负极板存储负电荷。在两极板上电荷产生的电场作用下, 电解液与电极之间的界面上会形成相反的电荷, 以平衡电解液的内电场。正电荷与负电荷以极短间隙排列在正、负极板上, 这个电荷分布层叫作双电层, 电容量非常大。当两极板间电势低于电解液的氧化还原电极电位时, 电解液界面上的电荷不会脱离电解液。随着超级电容放电, 正、负极板上的电荷被外电路泄放, 电解液界面上的电荷相应减少。由此可以看出, 超级电容的充放电过程始终是物理过程, 没有化学反应, 因此性能较稳定。

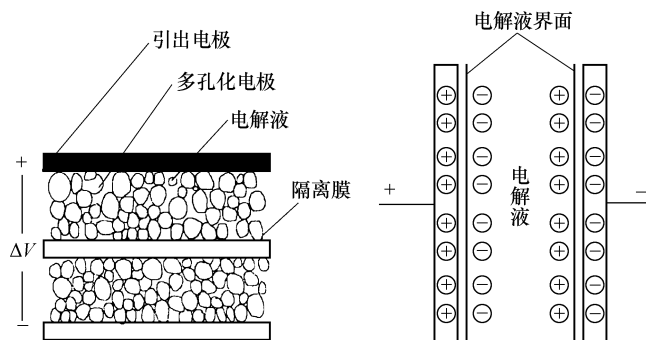


图 8-1-2 超级电容结构

超级电容是一种与动力电池和传统物理电容器都不同的新型储能器。由于超级电容本质上仍基于电容原理工作, 因此要使其电容量达到法拉级, 甚至上万法拉, 就必须使极板的有效表面积尽可能得大, 极板之间的距离尽可能得小。超级电容性能的最核心影响因素是电极材料, 常用的电极材料如下:

1) 活性炭电极材料。采用高比表面积的活性炭材料经过成型制备电极。

2) 碳纤维电极材料。采用碳纤维成形材料, 如布、毡等, 经过增强, 喷涂或熔融金属增强其导电性制备电极。



3) 碳气凝胶电极材料。采用前驱材料制备凝胶,经过碳化活化得到电极材料。

4) 碳纳米管电极材料。具有极好的中孔性能和导电性,采用高比表面积的碳纳米管材料,可制得性能优良的超级电容电极。

电容的大小取决于极板表面积和电极的距离,碳电极的大表面积与很小的电极距离结合,使超级电容的容值可以非常大,大多数超级电容可做到法拉级。

双电层介质在电容器两电极施加电压时,在靠近电极的电介质界面上产生与电极所携带电荷相反的电荷,并将其束缚在介质界面上,形成事实上的电容器的两个电极。两电极的距离非常小,仅几纳米,同时活性炭多孔化电极可获得极大的电极表面积,达到 $200\text{m}^2/\text{g}$ 。因此这种结构的超级电容具有极大的电容量,并可存储很大的静电能量。

(3) 赝电容超级电容工作原理

赝电容指在电极表面或体相的二维或准二维空间上,电活性物质进行欠电位沉积,发生高度可逆的化学吸附/脱附或氧化/还原反应,产生与电极充电电位有关的电容。赝电容不仅发生在表面,还可深入内部,因此可获得比双电层电容更高的电容量和能量密度。相同电极面积下,赝电容量可以是双电层电容的 10000 倍以上。目前,赝电容电极材料主要是一些金属氧化物和导电聚合物。

贵金属氧化物电容器通过在氧化物电极表面以及体相中发生快速氧化还原反应来达到储存电荷的目的,因此其电容也称赝电容或法拉第准电容。

(4) 混合型超级电容

超级电容也可在两极分别采用不同的电极材料,如一极是形成双电层电容的碳材料,另一极是利用赝电容储能的金属氧化物电极。在电压保持不变或略有提升的基础上,利用金属氧化物超级电容的超大比能量与双电荷层超级电容的有效配比,获得比双电层超级电容高很多的比能量。

此类电容器工作时,既有双电层电容的贡献,又包含准电容的作用,因此其比能量较单纯的双电层电容器大大提高,同时具备较高的比功率和循环寿命。根据使用条件的不同,其充放电次数可达 10 万次,甚至 50 万次。

8.1.3 超级电容的技术指标

超级电容是一种电容值比常规电容大得多的独特电容器,具有优良的脉冲充放电性能,以及传统电容器所不具备的大容量储能性能。超级电容的主要技术指标见表 8-1-1。

表 8-1-1 超级电容的主要技术指标

技术指标	定义	单位
额定容量	指按规定的恒定电流(如 1000F 以上的超级电容规定的充电电流为 100A, 200F 以下的为 3A)充电到额定电压后保持 23min,在规定的恒定电流放电条件下放电到端电压为零,所需的时间与电流的乘积再除以额定电压值	F
额定电压	超级电容的最高安全工作电压。此外还有浪涌电压,通常为额定电压的 105%。击穿电压,其值远高于额定电压的 1.53 倍	V



(续)

技术指标	定义	单位
电流	指对超级电容充电后，为使电容器在某一电压处于稳定状态而从外部施加的电流。额定电流指5s内放电到额定电压1/2的电流	A
等效串联电阻	当一个超级电容被模拟为包括电容、电阻的等效模拟电路时，其中的电阻部分即为等效串联电阻	Ω
最大存储能量	超级电容存储能量的理想值，是其从额定电压起进行恒流放电到电压为零时止，所累积放出的能量	J
能量密度	也称比能量，指单位质量或单位体积的电容器所能放出的能量	$W \cdot h/kg$ 或 $W \cdot h/L$
功率密度	也称比功率，指单位质量或单位体积的超级电容在匹配负荷下产生电/热效应各半时的放电功率。它表征超级电容承受电流的能力	kW/kg 或 kW/L
漏电流	指超级电容保持静态储能状态时，内部等效并联阻抗导致的静态损耗，通常为加额定电压72h后测得的电流	A
使用寿命	指超级电容的电容量低于额定容量的20%或等效串联电阻增大到额定值的1.5倍时的时间长度，此时可断定其寿命終了	h
循环寿命	超级电容经历1次充电和放电，称为1次循环或1个周期。超级电容的循环寿命可达10万次以上	次
平均放电功率	平均放电电流和平均放电电压的乘积	kW
放电效率	一个特定的充放电循环中，超级电容放出的能量占充入能量的百分比	%
电压保持能力	将超级电容恒流充电至额定电压，再以额定电压恒压充电30min，然后在室温条件下开路静置72h，此时超级电容端电压与额定电压的比值	%
时间常数 RC	如果把一个超级电容模拟为一个电荷和一个电阻的简单串联组合，则电容和电阻的乘积为时间常数	

8.1.4 超级电容的数学模型

超级电容的原理分析主要利用图 8-1-3 所示的简化电路模型，在超级电容的储能应用中，也称此模型为经典模型。

图 8-1-3 中，超级电容等效为一个理想电容器 C 与一个较小阻值的电感（等效串联阻抗 R_s ，一般为几毫欧）串联，同时与一个较大阻值的电阻（等效并联阻抗 R_L ）并联的结构。 R_s 模拟热损失和充放电过程中电压的损失突变， R_L 模拟自放电的渗漏损失。

超级电容的数学模型包括 3 个主要参数：

- 电容量（电位 V_C ）。
- 串联电阻 R_s 。
- 绝缘材料的漏电阻 R_L 。

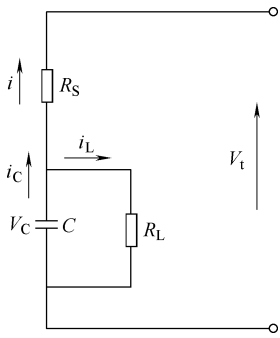


图 8-1-3 超级电容简化电路模型



超级电容的电位可表示为:

$$\frac{dV_c}{dt} = -\left(\frac{i + i_L}{C}\right) \quad (8-1-3)$$

漏电流 i_L 可表示为:

$$i_L = \frac{V_c}{R_L} \quad (8-1-4)$$

由式 (8-1-3) 和式 (8-1-4) 可得:

$$\frac{dV_c}{dt} = -\left(\frac{V_c}{CR_L} + \frac{i}{C}\right) \quad (8-1-5)$$

其解析解为:

$$V_c = \left[V_{c0} \int_0^t \frac{i}{C} e^{t/CR_L} dt \right] e^{-(t/CR_L)} \quad (8-1-6)$$

在放电期间, 超级电容的端电压可表示为:

$$V_t = V_c - iR_s \quad (8-1-7)$$

超级电容的充放电功率

$$P = V_t i \quad (8-1-8)$$

超级电容储存的能量

$$E_c = \int_0^t V_c I_c dt = \int_0^v C V_c dV_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (8-1-9)$$

式中, V_c ——超级电容单元的电压。

在额定电压情况下, 超级电容中所储存的能量达到最大值。

超级电容中可用的能量也可由其能量状态 (SOE) 表达。SOE 被定义为其端电压为 V_c 时的能量与全充电电压 V_{CR} 时对应能量之比, 即:

$$SOE = \frac{0.5 C V_c^2}{0.5 C V_{CR}^2} = \left(\frac{V_c}{V_{CR}} \right)^2 \quad (8-1-10)$$

8.1.5 超级电容的应用特性

相对于传统电容器, 超级电容的“超级”体现为以下3点:

➤ 超级电容在分离出的电荷中存储能量, 用于存储电荷的面积越大, 分离出的电荷越密集, 其电容量越大。

➤ 超级电容的面积基于多孔炭材料, 该材料的多孔结构允许其面积达到 $2000\text{m}^2/\text{g}$, 通过一些措施可实现更大的表面积。超级电容电荷分离开的距离是由被吸引到带电电极的电解质离子尺寸决定的。该距离比传统电容器薄膜材料所能实现的距离更小。

➤ 在很小的体积下达到法拉级的电容量。这种庞大的表面积结合非常小的电荷分离距离, 使超级电容较传统电容器而言有更大的静电容量, 这也是“超级”的根本含义。

与动力电池相比, 超级电容有以下优势:

➤ 转化效率高。超级电容在充放电过程中, 能量形式没有发生转变。动力电池是将电能转化成化学能, 再将化学能转化成电能。由于存在转化效率问题, 这种转化肯定会导致部分能量损失。超级电容充放电效率高, 达 95% 以上。化学电池的充放电效率低, 约为 70%。



超级电容可充电至其额定值以内的任何电压，并可完全放电后再存储电能而不会损坏。而动力电池组如果过度放电则会永久损坏。

➤ 输出功率密度高。超级电容的内阻很小，且在电解液界面和电极材料本体内均能实现电荷的快速储存和释放，因此它的输出功率密度可达一般动力电池的数十倍。

➤ 充放电特性好。超级电容具有与动力电池不同的充放电特性。超级电容的 SOC 与电压构成简单的函数，而动力电池的 SOC 则包括多重复杂的换算。超级电容的放电曲线如图 8-1-4 所示。在放电电流相同的情况下，电压随放电时间呈线性下降趋势。这种特性使超级电容的剩余能量预测及充放电控制，相对于动力电池简单了许多。放电时，由于同样不受大电流的限制，可大电流输出，瞬时输出功率较大，可满足混合动力有轨电车起动瞬间的加速需要。

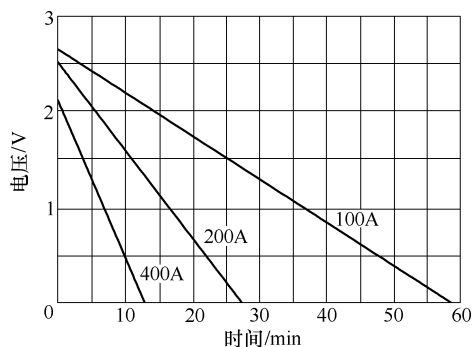


图 8-1-4 超级电容放电曲线

➤ 在容量定义方面，超级电容也不同于动力电池。超级电容的额定容量单位为法拉 (F)。定义为规定的恒定电流充电到额定电压后保持 2 ~ 3min，在规定的恒定电流放电条件下放电到端电压为零所需的时间与电流的乘积，再除以额定电压值。

➤ 超级电容与体积相当的传统电容器相比可存储更多能量。在一些功率决定能量存储器件尺寸的应用中，超级电容是一种更好的选择。

➤ 超长的充放电循环寿命。超级电容可反复传输能量脉冲而无任何不利影响，相反，如果动力电池反复传输高功率脉冲则其寿命会大打折扣。超级电容在充放电过程中没有发生电化学反应，其循环寿命可达 10 万次以上，这是只有数百次充放电循环寿命的动力电池所无法比拟的。

➤ 充电时间非常短。超级电容的充放电电路简单，无需特别的充电电路和控制放电电路。超级电容可快速充电，而动力电池快速充电会受到损害。由于不受充电电流大小的限制，充放电速度可变得很快，充电时间为 0.3s ~ 1min，温升小，完全满足混合动力有轨电车再生制动要求。

➤ 工作温度范围宽 (-40 ~ 50℃)，容量变化小。混合动力有轨电车用铅酸电池、锂电池等低温工作时，续驶里程甚至可能减少 90%，而超级电容只会减少 10% 左右。

➤ 储存寿命极长。超级电容储存过程中，虽然也有微小的漏电电流存在，但这种发生在电容器内部的离子或质子迁移运动是在电场作用下产生的，并没有出现化学或电化学反应，没有产生新物质。此外，所用的电极材料在相应的电解液中也是稳定的，因此理论上超级电容的储存寿命是无限的。

与其他储能装置相比，超级电容的劣势如下：

➤ 目前，比能量低是超级电容的显著缺陷，这在一定程度上限制了以超级电容为电源的混合动力有轨电车的续驶里程。

➤ 使用不当可能造成电解质泄漏等现象。

➤ 与铝电解电容器相比，它内阻较大，因此不可用于交流电路。



在选择超级电容时,主要考虑功率要求、放电时间及系统电压变化等因素。超级电容量大小由最高工作电压、工作截止电压、平均放电电流和放电时间等基本参数决定,可根据超级电容的数学模型进行估算。其中,超级电容的输出电压降由两部分组成:一部分是超级电容释放能量,另一部分是由超级电容内阻引起的。在非常快的脉冲放电中,以内阻部分为主,相反在长时间放电中,以容性部分为主。

8.2 超级电容在新能源车辆上的应用

超级电容具有广泛的用途。与燃料电池等高能量密度的物质相结合,超级电容可快速释放能量,满足高功率需求,从而使燃料电池可仅作能量源使用。目前,超级电容的能量密度可达 20kW/kg ,已经开始抢占传统电容器和动力电池之间的细分市场。

在要求高可靠性而对能量要求不高的应用中,可用超级电容来取代动力电池,也可将超级电容与动力电池结合起来,应用在对能量要求很高的场合,这样便可采用体积更小、更经济的动力电池。

超级电容可输出大电流,也可快速吸收大电流。与化学充电原理相比,超级电容的工作原理使其性能更稳定,因此超级电容的使用寿命更长。对于像电动工具和玩具这种需要快速充电的设备来说,超级电容无疑是很理想的电源。

超级电容的容量足够大,成本很低,对环境无污染。大功率超级电容对纯电动汽车和轨道车辆的启动、加速和上坡行驶具有极其重要的意义:在车辆启动和爬坡时,快速提供大功率电流;在车辆正常行驶时,由蓄电池快速充电;在车辆制动时,快速存储发电机产生的大电流,这可减少车辆对蓄电池大电流充电的限制,大大延长了蓄电池的使用寿命,提高车辆的实用性。

8.2.1 超级电容在纯电动车辆上的应用

在纯电动汽车的部件中,超级电容凭借使用寿命长、安全性强等特点,已成为开发的重要方向之一。对于纯电动公交车,由于公交线路站点是固定不变的,超级电容在 1min 之内即可完成充电,因此可利用公交车进站的时间充电,这样既不影响乘客的乘车时间,又可免于安装受电弓,及架设供电线,降低了建设成本,也更美观便捷。

以超级电容为能源的纯电动客车无污染、零排放、低温特性好,适合作为寒冷地区的公共交通工具,具有良好的市场前景和社会效益。

超级电容对整车动力性能的影响主要在于续驶里程方面。超级电容目前最大的缺点就是能量密度小,每次充电的行驶里程很短。但它的充电速度快,充完即可上路运行。因此可在站间距较短的线路运营。超级电容的容量、能量密度、放电深度、功率密度等性能参数都会影响车辆行驶的能量消耗程度和续驶里程。

8.2.2 超级电容在混合动力汽车上的应用

混合动力汽车的电起动系统中采用超级电容辅助起动装置具有以下优势:

- 1) 由于起动功率的增加,缩短了柴油-发电机组的起动时间。柴油机曲轴旋转加速度



增加,提高了柴油点燃质量。

- 2) 降低了起动时蓄电池组的最大电流负荷,有助于延长蓄电池的使用寿命。
- 3) 确保了起动的可靠性,在低温及蓄电池组亏电或参数变差时尤为明显。
- 4) 在现有蓄电池技术水平下,可有效减小蓄电池容量。

但超级电容并不能完全取代蓄电池,因为它的能量密度较低。超级电容单体的工作电压较低,因此要通过多个电容器单体的串联才能得到较高的工作电压。而多个单体串联对单体的统一性要求较高,且串联后体系的容量又会成倍减少。因此相同储电量下的系统体积仍然较大。

超级电容的特性正好满足混合动力汽车的特殊要求。利用超级电容瞬时高功率特性,不必再要求发动机频繁起动和蓄电池提供瞬间大功率,同时还可对制动能量进行回收利用,从而节约能源、减少排放污染。尤其适合经常在城市行驶的混合动力汽车。

蓄电池充电通过化学反应完成,所需时间较长,但车辆制动时间较短,因此回收能量效果不佳。目前多数厂商均以超级电容作为制动能量回收的储能装置。

此外,在为发动机冷起动提供瞬时大功率方面,一般蓄电池无法提供瞬时大功率,且易缩短使用寿命,因此不适合在低温下为起动发动机提供电能。而如果把超级电容和蓄电池联合应用在发动机起动系统中,构成新型起动系统,则这一问题可迎刃而解。

8.2.3 超级电容使用注意事项

超级电容使用注意事项如下:

- 1) 超级电容具有固定的极性,因此使用前应确认极性。
- 2) 超级电容应在标称电压下使用:超级电容电压超过标称电压时,会导致电解液分解,同时超级电容会发热,容量下降,内阻增加,寿命缩短。在某些情况下,可能导致超级电容性能崩溃。
- 3) 超级电容不可用于高频充放电电路,高频快速充放电会导致超级电容内部发热,容量衰减,内阻增加,在某些情况下会导致其性能崩溃。
- 4) 外界环境温度对超级电容的寿命有重要影响。超级电容应尽量远离热源。
- 5) 超级电容用作后备电源时,由于其内阻较大,放电瞬间存在电压降现象, $\Delta V = IR$ 。
- 6) 使用环境:超级电容不可置于相对湿度大于 85% 或含有毒气体的场所,这些环境会导致引线及超级电容壳体腐蚀,导致断路。
- 7) 超级电容的存放:不能置于高温、高湿的环境中,应尽量在温度 $-30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度小于 60% 的环境中储存,避免温度骤升骤降,因为这会导致其损坏。
- 8) 超级电容用于双面电路板时,需注意连接处不可经过与超级电容可接触的部位,否则会导致短路现象。
- 9) 把超级电容焊接到电路板上时,不可使其壳体接触电路板,否则焊接物会渗入超级电容穿线孔内,对超级电容性能产生影响。
- 10) 安装超级电容后,不可强行倾斜或扭动,这会导致其引线松动,造成性能劣化。
- 11) 在焊接过程中避免使超级电容过热:若在焊接中使超级电容过热,则会降低其使用寿命,例如若使用厚度为 1.6mm 的印制电路板,则焊接温度应为 260°C ,时间不超过 5s。



12) 焊接后的清洗: 超级电容经焊接后, 电路板及电容器需清洗, 因为某些杂质可能导致超级电容短路。

13) 将超级电容器串联使用时: 超级电容串联使用时, 存在单体间的电压均衡问题。单纯的串联会导致某个或几个单体超级电容过压, 从而损坏它们, 导致整体性能受到影响。因此在超级电容串联使用时, 需得到厂家的技术支持。

燃料电池基础知识及应用技术



9.1 燃料电池概述

9.1.1 燃料电池的种类

燃料电池 (Fuel Cell) 是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能, 通过电化学反应直接转化为电能的发电装置。从原理上看, 燃料电池有正负极和电解质, 燃料在正极被氧化, 氧化剂在负极被还原, 与蓄电池非常相似, 因此名为“电池”。两者的差异在于, 蓄电池的反应物都储存在其内部, 本质是储电设备, 而燃料电池的反应物和氧化剂是利用外部系统源源不断输送到电极上反应来发电的, 本质上是“发电机”。

与现有的发电机技术相比, 燃料电池发电的原理是电化学反应, 而不是通过热机做功发电, 因此效率很高。可见燃料电池的反应过程实质是电解水的逆过程, 在发电的同时产物只有水和热能, 是一种环境友好的发电装置。

燃料电池有很多类型, 其燃料类型、反应原理、工作温度、应用场景等均存在差异。按照电解质的不同, 可将燃料电池分为碱性燃料电池 (AFC)、磷酸燃料电池 (PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)、固体氧化物燃料电池 (SOFC)、质子交换膜燃料电池 (PEMFC)。在此分类方式下, 不同类型燃料电池的主要区别见表 9-1-1。

表 9-1-1 不同类型燃料电池的主要区别

燃料电池	碱性 (AFC)	磷酸 (PAFC)	熔融碳酸 (MCFC)	固体氧化物 (SOFC)	质子交换膜 (PEMFC)
电解质	KOH	H_3PO_4	$\text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{K}_2\text{CO}_3$	$\text{Y}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$	质子交换膜
工作温度	65 ~ 220℃	180 ~ 220℃	约 650℃	500 ~ 1000℃	室温 ~ 150℃
质量功率/ (W/kg)	35 ~ 105	100 ~ 200	30 ~ 40	15 ~ 20	300 ~ 1000
输出功率密度/ (W/cm ²)	0.5	0.1	0.2	0.3	1 ~ 2
燃料种类	H_2	天然气、甲醇、 液化石油气	天然气、液化 石油气	H_2 、CO、天然气	H_2
氧电极的 氧化物种类	O_2	空气	空气	空气	空气



(续)

燃料电池	碱性 (AFC)	磷酸 (PAFC)	熔融碳酸 (MCFC)	固体氧化物 (SOFC)	质子交换膜 (PEMFC)
特性	1) 需使用高纯度氢气作燃料 2) 低腐蚀性 及低温, 较易选择材料	1) 进气中含 CO 会导致触媒中毒 2) 废热可利用	1) 不受进气 CO 影响 2) 反应时需循环使用 CO ₂ 3) 废热可利用	1) 不受进气 CO 影响 2) 高温反应, 不依赖触媒的特殊作用 3) 废热可利用	1) 需使用高纯度氢气作燃料 2) 功率密度高, 体积小, 质量轻 3) 低腐蚀性及低温, 较易选择材料 4) 废热可利用
优点	1) 起动快 2) 室温常压下工作	1) 对 CO ₂ 不敏感 2) 成本相对较低	1) 可用空气作氧化剂 2) 可用天然气或甲烷作燃料	1) 可用空气作氧化剂 2) 可用天然气或甲烷作燃料	1) 可用空气作氧化剂 2) 固体电解质 3) 室温工作 4) 起动迅速
缺点	1) 需以纯氧作氧化剂 2) 成本高	1) 对 CO 敏感 2) 起动慢 3) 成本高	1) 工作温度较高 2) 起动缓慢	1) 工作温度高 2) 起动缓慢 3) 冷起动循环性能差	1) 对 CO 非常敏感 2) 需用贵金属催化剂
发电效率	45% ~ 60%	35% ~ 60%	45% ~ 60%	50% ~ 60%	40% ~ 50%
应用情况	主要用于航天器、潜艇	应用于分布式发电厂	应用于兆瓦级发电厂	应用于兆瓦级发电厂	应用于移动电源、备用电源、车用发动机等

从技术发展角度看, 燃料电池技术的发展大致经历了四代, 见表 9-1-2。

表 9-1-2 燃料电池技术的代际特征

代际	典型产品	特征描述
第一代	碱性燃料电池	电解质为碱性。氧的还原电极反应在碱性溶液中更容易进行, 因此以氢氧化钠、氢氧化钾等碱作电解质更容易获得实用化的燃料电池装置。但是, 碱溶液容易与空气中的二氧化碳反应生成碳酸盐, 从电解液中析出, 从而使燃料电池失效。因此这种燃料电池不适合用空气及重整氢气作燃料和氧化剂
第二代	磷酸燃料电池	将碱性电解液更换成酸性电解液, 可很好地解决碱性燃料电池中电解液与二氧化碳反应的问题。磷酸是一种中强酸, 在 200℃ 左右的较高温度下具有足够的反应活性。但是, 与第一代碱性燃料电池相同, 磷酸燃料电池也属于液态电解质, 由于电解液具有流动性, 负极与正极之间需要保持适当的压差范围, 否则容易导致负极与正极串气, 引起爆炸
第三代	熔融碳酸盐燃料电池	采用碳酸盐作电解质, 在 600℃ 左右的高温下, 碳酸盐变成熔融态, 具有良好的离子导电特性和半流动性, 对于负极、正极之间的压力耐受范围更宽, 同时也可使用含碳燃料和空气进行反应。但这种燃料电池反应温度高, 起动停机时间长, 循环特性不好。同时, 与磷酸燃料电池一样, 能量密度较低, 难以实现小型化



(续)

代 际	典 型 产 品	特 征 描 述
第四代	固 态 电 解 质 燃 料 电 池	包括质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池两类。这两类燃料电池的电解质都为固体，但呈现明显的两极分化。质子交换膜燃料电池采用具有质子传导特性的高分子膜作电解质，需在较低温度下工作，否则容易失水造成质子传导特性失效。固体氧化物燃料电池采用具有氧离子传导特性的固体氧化物材料作电解质，需在高温下工作，否则没有氧离子传导活性

表 9-1-3 梳理了燃料电池的应用情况。

表 9-1-3 燃料电池的应用情况

应用方向	应用类别	描 述
空间及 军事 应用	空间应用	20 世纪 50 年代后期，美国政府将燃料电池用于“双子星”宇宙飞船，燃料电池重量轻，供电供热可靠，噪声低，无振动，并能生产饮用水，是其它能源装置不可比拟的，这是第一次商业化使用燃料电池。从 20 世纪 60 年代起，飞机制造商 Pratt & Whitney 为阿波罗项目提供燃料电池，该燃料电池是一种碱性燃料电池，三组可产生 1.5kW 或 2.2 kW 电力，并行工作，可供飞船短期飞行。每组燃料电池重约 114kg，装填有低温氢和氧。在 18 次飞行中，这种燃料电池共工作 10000h，未发生一次飞行故障。在 20 世纪 80 年代航天飞机开始应用时，Pratt & Whitney 的姊妹公司国际燃料电池公司继续为 NASA 提供航天飞机使用的碱性燃料电池。飞船上所有的电力需求由 3 组 12kW 燃料电池提供。国际燃料电池公司技术的进一步发展使每个飞船上使用的燃料电池存储器能提供约等于阿波罗飞船上同体积燃料电池 10 倍的电力。以低温氢和氧为燃料，这种燃料电池的效率为 70% 左右。在 100 多次飞行中，这种燃料电池工作时间超过 80000h
	燃料电池 潜艇	目前在军事上应用最为成功的是燃料电池潜艇。2003 年 4 月 7 日，德国制造的 U31 号潜艇在基尔港正式下水。该潜艇是世界上第一艘采用燃料电池的潜艇，该艇采用 300kW 燃料电池系统作为动力。到 2020 年，全世界预计将有 29 艘燃料电池潜艇服役
	便携式电源	燃料电池比普通的固体电池具有更长的使用时间，意味着可满足作战需要。便携式燃料电池可作为单兵电源、便携式雷达电源、无人飞机电源、遥控机器人电源等，满足各种武器系统需要。这类应用目前主要使用甲醇或甲醇重整氢气作燃料的质子交换膜燃料电池或使用燃油作燃料的固体氧化物燃料电池
备用电源 及分布式 电站	基站备用 电源	燃料电池作为一种灵活、可扩展的新型备用电源，在通信设备和远程电源领域中的价值已经得到验证，并在多个发展中国家的电信基站收发台（BTS）中得到应用。受自然环境的影响，普通基站电网经常处于瘫痪状态，以燃料电池作备用电源将有助于获得可靠的电网支撑和完善的离网发电解决方案。在英国、美国，以燃料电池作备用电源用于发展电信网络已经纳入新一期的能源政策
	家用热电联 供系统	采用燃料电池发电满足家庭部分用电需求，同时提供家庭热水。燃料电池系统将千瓦级天然气制氢、燃料电池发电及余热利用有机结合在一起，将一部分天然气的高品质化学能通过氢气转化为电能，低品质能量则用于采暖及生活热水供应，这可有效提高系统的能量利用程度，发电效率达到 40%~50%，综合热效率达到 90%。 目前家用燃料电池市场主要集中在北美和亚洲，特别是日本，1 台额定发电功率 1kW 的 ENE-FARM 燃料电池大体可满足普通日本家庭 60% 的电力需求及 80% 的热水需求



(续)

应用方向	应用类别	描 述
备用电源及分布式电站	固定式燃料电池电站	熔融碳酸盐燃料电池和固态氧化物燃料电池等高温燃料电池将用于大型工业设施和兆瓦级发电厂。当工作温度上升到 600 ~ 1100℃ 时, 这种高温燃料电池可耐受氢污染源, 因此可使用未加重整的天然气、柴油或汽油。此外, 它们所产生的热能还可用来驱动蒸汽轮机再进行发电。根据 Fuel Cell Today 的统计数据, 2012 年大型固定式燃料电池电站的安装量约为 128MW, 大型燃料电池电站应用主要集中在美国 and 韩国
交通应用	燃料电池汽车 (FCV)	燃料电池汽车是目前最受关注的燃料电池应用领域, 全球主要汽车生产商都在集中力量开发燃料电池汽车。2013 年全球汽车巨头分别结成了燃料电池汽车开发的三大联盟
	燃料电池叉车	美国是目前燃料电池叉车示范运营规模最大的国家。截至 2013 年 5 月, 累计有 618 辆燃料电池叉车在 13 个示范点运行, 累计运行超过 140 万 h

9.1.2 几种典型的燃料电池

(1) 碱性燃料电池

碱性燃料电池以氢氧化钾 (KOH) 溶液作电解液, 传导电极之间的离子。由于电解液为碱性, 其离子传导机理不同于质子交换膜燃料电池。被碱性电解液迁移的离子是氢氧离子 (OH^-), 这会对燃料电池其他方面的性能产生影响。反应式如下:

正极: $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

负极: $\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{OH}^-$

不同于酸性燃料电池, 水是在氢电极处生成的。此外在负极处, 氧的还原需要水, 而水的管理问题往往按电极防水性和在电解液中保持含水量的需求进行分解。负极反应从电解液中消耗水, 而正极反应则排出水生成物。过量的水 (每次反应 2mol) 在燃料电池堆外汽化。

碱性燃料电池可运行在宽温度 (80 ~ 230℃) 和压力 (2.2 ~ 45atm) 范围内。高温碱性燃料电池也可使用高浓度电解液, 致使离子迁移机理从水溶剂转换成熔融盐状态。

受氢氧电解液所提供的快速动力学效应影响, 碱性燃料电池可获得很高的效率。尤其是氧的反应 ($\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}^-$) 比酸性燃料电池中氧的还原反应容易得多, 因此活性损耗非常低。碱性燃料电池中的快速动力学效应使银或镍可替代铂作催化剂。这使碱性燃料电池堆的成本显著下降。

通过电解液的完全循环, 碱性燃料电池动力学特性得到进一步改善。电解液循环时, 燃料电池成为“动态电解液的燃料电池”。这类结构的优点包括: 电解液被用作冷却介质, 因此易于热管理; 更为均匀的电解液集聚, 解决了负极周围电解液浓度分布问题; 提供了利用电解液进行水管理的可能性; 如果电解液已被二氧化碳过度污染, 则可通过替换电解液来解决; 可从燃料电池内替换电解液, 从而显著延长燃料电池的使用寿命。

碱性燃料电池最大的问题在于二氧化碳的毒化。二氧化碳与反应气一起进入燃料电池, 碱性电解液对二氧化碳具有显著的化合力, 它们共同作用形成碳酸离子 CO_3^{2-} 。生成物为 K_2CO_3 。因为 K_2CO_3 的水溶液电导率远低于 KOH 溶液, 所以会导致燃料电池欧姆极化加剧, 性能下降。此外, K_2CO_3 水溶液的蒸汽压高, K_2CO_3 的生成会导致隔离膜失水、盐结晶析出, 严重时会使隔离膜失去阻气功能, 氢、氧互窜而导致燃料电池失效。即碳酸的沉积和阻



塞电极将成为潜在的风险，但这一问题可通过电解液的循环来解决。使用二氧化碳除气器是增加成本和复杂度的解决方法，它能从空气流中排除二氧化碳气体。

碱性燃料电池的优点在于，其所需的是廉价催化剂、电解液，以及高效率 and 低温运行条件。碱性燃料电池最大的问题在于二氧化碳的毒化。动力电池对燃料电池中的二氧化碳敏感，碱性电解液对二氧化碳有显著化合力，电解液与二氧化碳接触会生成碳酸根离子，削弱了燃料电池的性能和输出功率。

(2) 磷酸燃料电池

磷酸燃料电池与碱性燃料电池一样，依靠酸性电解液传导氢离子。其正极和负极反应类似于碱性燃料电池。磷酸 (H_3PO_4) 是一种黏滞液体，它在燃料电池中通过多孔硅碳化物基体内的毛细管储存。

磷酸燃料电池是最早成为商品的燃料电池。许多医院、宾馆和军事基地使用磷酸燃料电池覆盖了部分或总体所需的电力和热供应。由于磷酸燃料电池功率密度很低，加上其工作温度的限制，导致系统过于庞大，使其基本不可能在车辆中应用。

磷酸电解液的温度必须保持在 42°C (其冰点) 以上。冻结的和再解冻的磷酸难以使燃料电池堆激化。保持燃料电池堆在该温度之上，需要额外的设备，这就会增加成本、复杂性、重量和体积。大多数问题就固定式应用而言是次要的，但对车辆应用来说是不相容的。

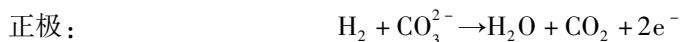
另一源于高运行温度 (150°C 以上) 的问题是燃料电池堆升温相伴的能量损耗。每当燃料电池启动时，一些能量 (即燃料) 必然消耗在加热燃料电池直至其运行温度的过程中。而每当燃料电池关闭时，相应的热量 (即能量) 即被耗损。对于市区内的短时运行而言，该损耗是显著的。

磷酸燃料电池的优点是应用了廉价的电解液、可低温运行，及其合理的启动时间，缺点是采用了昂贵的催化剂 (铂)、酸性电解液的腐蚀性、二氧化碳的毒化和低效率。

(3) 熔融碳酸盐燃料电池

熔融碳酸盐燃料电池为高温燃料电池 ($500 \sim 800^\circ\text{C}$)，它依靠熔融碳酸盐 (通常为锂-钾碳酸盐或锂-钠碳酸盐) 传导离子。被传导的离子是碳酸离子 (CO_3^{2-})，离子传导机理类似于磷酸燃料电池或高浓度的碱性燃料电池。

熔融碳酸盐燃料电池的电极反应不同于其他燃料电池，即



其主要差异在于负极处必须供给二氧化碳。因二氧化碳可从正极中回收，故不需外部二氧化碳供应源。熔融碳酸盐燃料电池不用纯氢，而是使用碳氢化合物。

高温燃料电池的主要优点是具有几乎直接处理碳氢化合物燃料的能力。高运行温度使其在电极处便能分解碳氢化合物制氢。这使其应用于有轨电车或汽车后拥有极大优势。

但是，熔融碳酸盐燃料电池受限于电解液和运行温度，也存在许多问题。碳酸盐是碱性物质，在高温下腐蚀性极强。这不仅不安全，还会对电极形成腐蚀。在车辆上安装一个温度为 $500 \sim 800^\circ\text{C}$ 的大型设备，显然是不安全的。与燃料电池升温相伴随的燃料消耗也是一个问题，这还会因很高的运行温度以及熔融电解液所必需的潜热而变得更为严重。这些问题都可能制约熔融碳酸盐燃料电池应用于固定式或恒定功率需求的场合，如船舶上的应用。



(4) 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池的关键材料与部件包括电催化剂、电极（负极与正极）、质子交换膜和双极板。目前最常见的是氢-氧型质子交换膜燃料电池，其基本工作原理是氢氧反应产生的吉布斯自由能直接转化为电能。工作过程包括：

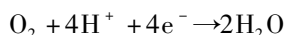
① 氢气通过管道或导气板到达正极。

② 在正极催化剂的作用下，1 个氢分子解离为 2 个质子，并释放出 2 个电子。

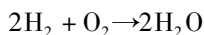
正极反应式为：



③ 在燃料电池的另一端，氧气（或空气）通过管道或导气板到达负极。在负极催化剂的作用下，氧分子和氢离子与通过外电路到达负极的电子发生反应生成水。负极反应式为：



总化学反应式为：



电子在外电路形成直流电。因此，只要源源不断地向燃料电池正极和负极供给氢气和氧气，就可向外电路的负载连续输出电能。

理想的燃料电池系统是可逆热力学系统，在不同的工作温度、工作压力条件下，可通过热力学定律计算出在理想可逆情况下燃料电池的发电效率及单电池电压的变化规律。

实际上，开始反应产生电流时，燃料电池的工作电压会降低很多，原因主要有以下 3 点：

① 在电极上，活化氢气和氧气的能量要消耗一部分电动势。

② 电极发生反应后，燃料电池内部的物质移动扩散，所需能量消耗部分电动势。

③ 电极与电解质之间有接触阻抗，电极和电解质本身也有电阻，这也要消耗与电流大小成正比的电动势。

受活化阻抗、扩散阻抗和电阻的综合作用，燃料电池单体的实际工作电压一般为 0.6~0.8V。

质子交换膜燃料电池的工作温度约为 80℃。在此温度下，电化学反应能正常地缓慢进行，通常用每个电极上的高度分散的铂金颗粒来催化。

质子交换膜燃料电池采用固态聚合物膜电解质。该聚合物膜为全氟磺酸膜（例如美国杜邦公司的 Nafion 膜），这种膜包含大量强酸性磺酸基团，质子可在其内部迁移。质子交换膜燃料电池所用的燃料是高纯氢气，氧化剂可使用氧气或空气。

聚合物电解质膜被碳基催化剂所覆盖。催化剂直接与扩散层和电解质两者接触，以获得最大的相互作用面。催化剂构成电极，其上为扩散层。电解质、催化剂层和气体扩散层的组合称为膜电极组件。

质子交换膜燃料电池中的催化剂是决定电堆成本及寿命的关键。在早期实践中，为使燃料电池在特定条件下运行，需要很可观的铂载量。目前，在催化剂技术方面已取得巨大进展，使铂载量从 28mg/cm² 减少到 0.2mg/cm²。由于燃料电池运行温度低，以及电解质显酸性，催化剂层需要贵金属。因为氧的催化还原作用比氢的催化氧化作用更难发挥，所以负极是最关键的电极。

在质子交换膜燃料电池中，另一关键性问题是水的管理。为使燃料电池在特定条件下运行，聚合物膜必须保持湿润。事实上，聚合物膜中离子的导电性需要一定湿度。若聚合物膜



过于干燥，则没有足够的酸离子承载质子。若聚合物膜过于湿润，则扩散层的细孔会被阻断，使反应气体不能扩展触及催化剂。

质子交换膜燃料电池存在催化剂毒化问题。铂催化剂极富活性，其对一氧化碳和硫的生成物与氧相比有更高的亲合力。毒化效应强烈地约束了催化剂，并阻碍了扩展到其中的氢或氧，导致电极反应不能在毒化部位发生，进而使燃料电池性能衰减。若氢由重整气提供，则气流中会含有一氧化碳。同样，若吸入的空气来自被污染城市中的大气，则一氧化碳也可从空气的气流中进入燃料电池。空气中的硫氧化物会使燃料电池陷入更为严重的毒化效应。由一氧化碳引起的毒化是可逆的，但它增加了成本，且各燃料电池需单独处理。

(5) 无氢燃料电池

无氢燃料电池可直接处理除氢之外的燃料。典型的无氢燃料电池包括直接甲醇质子交换膜燃料电池、氨碱性燃料电池、直接碳氢化合物熔融碳酸盐或固态氧化物燃料电池等。其中，氨碱性燃料电池是替换氨热裂化的可选方案。氨气直接供给燃料电池，并在正极催化裂解。氨碱性燃料电池反应会输出稍低些的热力学电压，与氢碱性燃料电池相比，其活性损耗较高。这一活性损耗可通过改进催化剂层来减小。熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）和固态氧化物燃料电池（SOFC）的工作温度高，因此可通过直接裂化碳氢化合物来在其内部提取氢。

9.1.3 燃料电池的优缺点

燃料电池的优缺点见表 9-1-4。

表 9-1-4 燃料电池的优缺点

优点	洁净	使用内燃机发电，燃料在气缸内燃烧会释放 CO _x 、NO _x 、SO _x 气体和粉尘等污染物。而燃料电池以氢气和氧气作燃料，唯一生成物质为水，不会产生有害物质，实现零排放
	节能、转换效率高	燃料电池通过电化学反应直接将燃料的化学能转化为电能，中间无燃烧过程，电效率可达 40%~50%，比内燃机的效率高 10%
	温度低，噪声低	燃料电池系统中配备有空压机、水泵、散热器等有限的运动部件，与内燃机相似，但电堆本身无运动部件，比内燃机的振动和噪声低。同时，电堆反应温度低，系统红外特征小
缺点	寿命较短	燃料电池内部的材料性能衰减，导致电堆输出性能逐渐变差，寿命不足以满足应用需求。目前，电站应用的燃料电池使用寿命可达 4 万 h，车用燃料电池使用寿命可达 15000h（以巴拉德为例）。按有轨电车运行服役期 30 年考虑，还需进一步完善电堆和系统以延长服役寿命。 此外，燃料电池辅机系统包含的空压机、水泵、过滤器等关键部件，寿命都比电堆还要低一些，属于定期更换产品
	成本较高	目前，燃料电池系统的电堆及其辅助部件的生产费用仍然较高，导致燃料电池系统的单位功率成本是内燃机的数十倍。 一般情况下，燃料电池电堆使用到 15000h 左右时，可对电堆进行一次翻新，成本约为采购新电堆的一半左右，然后电堆即可视为报废。 氢能供应方面，氢的生产、储存、运输、加注等氢能网络设施建设还远未形成像柴油一样的，从油井到加油站的便捷网络，氢能使用成本高
	安全性要求很高	不论液态氢还是气态氢，其生产、储存、保管、运输、灌装或重整都比较复杂，对安全性要求很高



9.1.4 有轨电车用燃料电池急需解决的问题

有轨电车用燃料电池急需解决以下问题：

1) 开发和应用燃料电池系统配件和生产工艺，大幅削减燃料电池系统生产成本。在燃料电池系统中，核心部件是燃料电池电堆，需要通过改进双极板生产工艺、降低铂载量或使用非铂催化剂、使用新型质子交换膜等方法来降低电堆成本。系统中，还包括氢气循环泵、空气压缩机、加湿器等辅助部件，这些部件在系统成本中也占据了很大部分。由于目前这些配件还未大规模生产，成本很高，可靠性也有待提高，需要开发燃料电池系统专用配件，降低辅助系统成本。

2) 研究燃料电池性能衰减机理，研究低成本、长寿命燃料电池材料及燃料电池系统优化控制方法，大幅提升燃料电池系统寿命。燃料电池的寿命取决于每个单片电池的电化学活性，这种电化学活性会在多种因素促动下降低：燃料电池在工作中，催化剂的形貌和微观状态会发生变化，活性降低；空气中的杂质气体也会污染催化剂表面，造成催化剂失去活性；质子交换膜会在某些基团的作用下发生腐蚀，直至膜上出现穿孔而造成电堆失效；气体扩散电极的特性会随工作时间的延长而发生变化，使燃料电池性能发生衰减；加湿水中的杂质离子会占据质子膜中的活性位，使质子传导率降低。因此，需更加深入地研究燃料电池性能衰减和失效机理，以及相关解决方案，大幅提高其寿命。

3) 采用系统模块化设计，优化系统结构，大幅提高燃料电池系统质量和体积功率密度。对车用燃料电池发动机系统而言，需要在满足功能的情况下，对系统部件进行集成设计，提高集成度，降低体积和重量，优化模块设计，完善模块功能。

4) 必须开发质量轻、成本低、安全性高的车载储氢罐，提高续航里程和车载用氢安全性。燃料电池反应所需的氧气可通过空气压缩机从空气中获取，而氢气必须靠燃料储存系统供应。目前的储氢方法包括高压储氢、固态合金储氢、液氢等。高压储氢将氢气压缩到35 ~ 70MPa，储存在高压氢瓶中，体积能量密度和重量能量密度适中，适合交通工具应用。固态合金储氢的单位重量能量密度低，不适用于燃料电池有轨电车。液氢的体积和重量能量密度都高，但需要绝热储氢罐在极低温度下储存氢气，成本高。氢气也可通过一些液态燃料制备得到，例如甲醇重整、氨分解等工艺。但液态燃料制氢系统体积、重量和成本都较高，不能很好满足燃料电池动态需要。从成本上看，储氢罐在燃料电池系统中占据了相当大的份额，铝内胆和高强度碳纤维的生产工艺都比较复杂，成本高。为降低成本，已开始使用塑料内胆储氢瓶。对燃料电池系统应用而言，还需进一步研究储氢瓶的结构和性能，降低成本以满足应用需求。

9.2 燃料电池系统结构与工作原理

以下主要介绍目前应用于有轨电车，基于氢气和氧气发电的质子交换膜燃料电池系统技术。

9.2.1 燃料电池的工作原理

燃料电池的基本原理相当于电解反应的可逆反应。图 9-2-1 所示为燃料电池结构与电化



学反应原理。氢气和氧气在燃料电池的负极和正极上借助催化剂的作用电离成离子，离子通过两电极中间的电解质在电极间迁移，进而在负电极、正电极间形成电压。在电极同外部负载构成回路时就可向外供电（发电）。

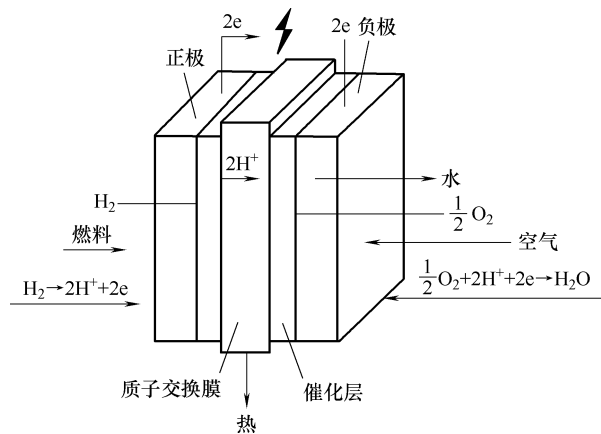


图 9-2-1 燃料电池结构与电化学反应原理

燃料电池的电极通常做成平板，再附上一层薄电解质，如图 9-2-2 所示。电极结构通常是多孔的，这种多孔结构保证了两侧的电解质和气体可顺利通过，这样的结构使电极、电解质和气体之间有了最大程度的接触。

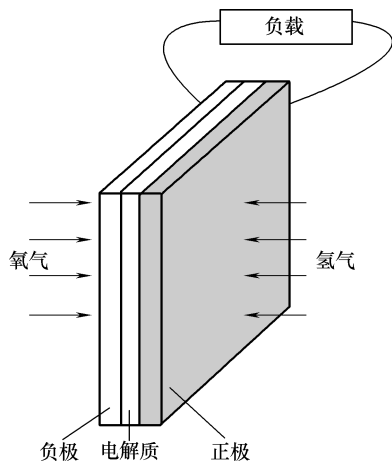


图 9-2-2 燃料电池负极-电解质-正极的基本结构

燃料电池是一种原电池，借助于电化学过程，其内部燃料的化学能直接转换为电能。燃料和氧化剂持续且独立地供给燃料电池的两个电极，并在电极处进行反应。电解质的作用是辅助离子从一个电极传导至另一电极。

燃料供给正极，依靠催化剂，电子从燃料中释放。在两电极间电位差的作用下，电子经外电路流向负极，正离子和氧结合，形成水。

燃料电池中的化学反应类似于蓄电池中的化学反应。燃料电池的热力学电压与反应中释



放的能量和转移的电子数密切相关。原电池反应释放的能量由吉布斯自由能的变化量给出，通常以每摩尔克分子量表达。

理想情况下，燃料电池化学反应所释放出的最大电能量为反应过程中的吉布斯自由能变化量，燃料电池输出电压和吉布斯自由能存在一一对应关系。但在实际应用时，燃料电池的输出电压要低于上述对应值，且随工作状态的变化而变化，尤其是会随电流的增大而降低。造成燃料电池输出电压和理想状态存在较大差异的原因，是燃料电池在电化学反应过程中存在以下方面的能量损失，造成系统的不可逆性（又称极化现象）：活性极化、燃料的穿透和内部短路电流、欧姆极化、浓差极化。这些现象的成因不尽相同，且在不同的工作条件下，各种极化现象对系统的影响程度也不同。4种极化现象的影响机理见表9-2-1。

表 9-2-1 4 种极化现象的影响机理

极 化 现 象	影 响 机 理
活性极化	指由于电化学反应过程中电极表面的反应速度过慢而导致的能量损失。在开路情况下已经存在，主要由燃料电池本身的特性决定 活性极化现象在小电流工况下比较明显
燃料的穿透和内部短路电流	尽管理论上电解质只允许质子通过，但事实上总会存在一定数量的燃料扩散和电子流通过电解质，从而造成能量损失，直接反映为开路电压降低。有观点认为该现象也属于活性极化
欧姆极化	指电子通过电极材料、各种连接部件及离子通过电解质的阻力引起的能量损失。欧姆极化在燃料电池正常工作情况下作用最为明显，输出电压的下降基本与电流密度呈线性关系变化，故又称阻抗损失 欧姆极化现象在比较宽的范围内作用都比较明显
浓差极化	指由于电化学反应中的电极表面反应物被消耗，浓度下降，导致无法向电极表面提供足够的反应物而引起的电压损失。在正常的燃料电池中，要避免明显的浓差极化现象出现 浓差极化现象一般出现在电流密度较大的工况，会造成输出电压急剧下降

9.2.2 质子交换膜燃料电池系统的组成

单独的燃料电池电堆是不能发电并用于有轨电车的，它必须和氢气供给与循环系统、氧气（空气）供给系统、热管理系统及一个能使上述各系统协调工作的控制系统组成燃料电池发电系统，简称燃料电池系统。燃料电池系统主要由燃料电池电堆和辅机系统组成，辅机系统包括：

- 氢气供给与循环系统。
- 氧气（空气）供给系统。
- 供给管道系统和调节系统（包括空压机、冷却水泵和管路等）。
- 水/热管理系统。

燃料电池实际上是一个大的发电系统。对于质子交换膜燃料电池，需要有燃料供应系统、氧化剂系统、发电系统、水管理系统、热管理系统、电力系统及控制系统等。下面以质子交换膜燃料电池系统为例进行讲解。



质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 采用可传导离子的聚合膜作为电解质, 因此也称聚合物电解质燃料电池 (PEFC)、固体聚合物燃料电池 (SPFC) 或固体聚合物电解质燃料电池 (SPEFC)。

(1) 系统组成

质子交换膜燃料电池是在电动汽车和有轨电车上最有应用前景的电力能源之一。组成质子交换膜燃料电池的基本单元是单体燃料电池。如前所述, 单体燃料电池的电化学电动势约为 1V, 其电流密度为数百毫安/ cm^2 。因此, 一个实用化的质子交换膜燃料电池系统, 必须通过单体燃料电池的串联和并联形成具有一定功率的电池组, 才能满足绝大多数用电负载的需求。此外, 还要为系统配置氢燃料储存单元, 空气 (氧化剂) 供给单元, 电池组温度、湿度调节单元, 功率变换单元及系统控制单元等, 将多个单体燃料电池组成为一个连续、稳定的供电电源。

1) 燃料电池组 (堆)。质子交换膜燃料电池的单体电池, 其化学电动势为 1.0 ~ 1.2V, 带负载时的输出端电压为 0.6 ~ 0.8V。为满足负载的额定工作电压, 必须将单体燃料电池串联起来构成具有较高电压的电池组。受到材料 (如质子交换膜等) 及工艺水平的限制, 目前单体燃料电池的输出电流密度约为 (300 ~ 600mA)/ cm^2 。因此, 为提高燃料电池的输出电流能力, 只能将若干串联的电池组并联, 组成具有较大输出能力的燃料电池堆。燃料电池堆是由大量的单体燃料电池串并联而成的, 因此存在向每个单体电池供给燃料与氧化剂的均匀性和电堆热管理问题。

2) 燃料及氧化剂的储存与供给单元。为使质子交换膜燃料电池实现连续稳定的运行发电, 必须配置燃料 (H_2) 及氧化剂 (O_2 或空气) 的储存与供给单元, 以便不间断地向燃料电池提供电化学反应所需的氢和氧。燃料供给部分由储氢系统及减压阀组成。氧化剂供给部分由储氧系统、减压阀或空气泵组成。

3) 燃料电池湿度与温度调节单元。质子交换膜燃料电池运行过程中, 随负载功率的变化, 电池组内部的工况也要相应改变, 以保持燃料电池内部电化学反应的正常进行。对质子交换膜燃料电池运行影响最大的两个因素是电池内部的湿度与温度。因此, 在燃料电池系统中需要配置湿度与温度调节单元, 以使质子交换膜燃料电池在负荷变化时仍工作在最佳工况下。

4) 功率变换单元。质子交换膜燃料电池所产生的电能为直流电, 其输出电压因受内阻的影响还随负荷的变化而改变。基于上述原因, 为满足大多数负载对交流供电和电压稳定性的要求, 在燃料电池系统的输出端需要配置功率变换单元。当负载需要交流供电时, 应采用 DC/AC 逆变器。当负载要求直流供电时, 需要用 DC/DC 变换器实现燃料电池组输出电能的升压与稳压。

5) 系统控制单元。由上述 4 个功能单元的配置和工作要求可知, 质子交换膜燃料电池系统是一个涉及电化学、流体力学、热力学、电工学及自动控制等多学科的复杂系统。质子交换膜燃料电池系统在运转过程中, 需要调节与控制的物理量和参数非常多, 难以手动完成。为使质子交换膜燃料电池系统长时间安全、稳定发电, 必须配置系统控制单元, 以实现燃料电池组与各功能单元的协调工作。

由于燃料电池发电过程中需要不断输入燃料和氧化剂, 排出反应产物, 一套燃料电池要正常工作, 必须配备燃料储存装置、燃料/氧化剂输送装置, 同时需要控制进入燃料电池电



堆的反应物和氧化剂的量及产物，还要将其内部产生的热量导出并散发掉。此外，由于输出电压较低，且伏安特性软，功率变化范围大，需要一套能量变换系统来为负载稳定供电。综上，燃料电池发电系统与内燃机发电系统非常相似，需要包括燃料储存与调节系统、氧化剂输送与调节系统、燃料电池电堆、散热系统、电力变换系统、控制系统等。例如一套质子交换膜燃料电池系统，就需要包括氢气供应系统、空气供应系统、散热循环系统、电堆、控制系统等，其系统结构如图 9-2-3 所示。

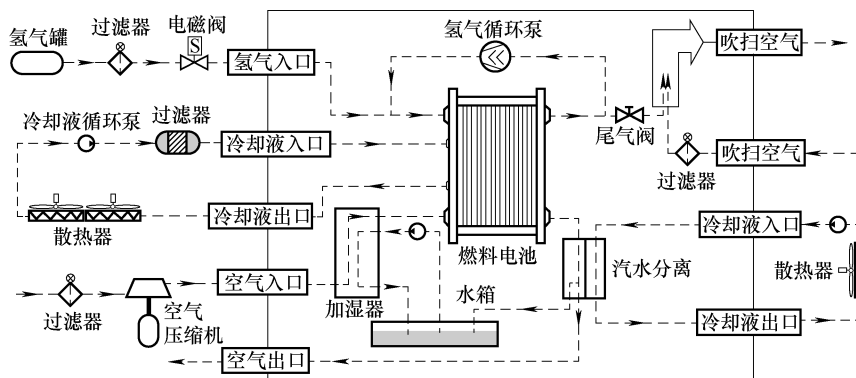


图 9-2-3 典型的燃料电池发电机系统

(2) 国内关于质子交换膜燃料电池系统研发的一些问题

我国将研发燃料电池客车和燃料电池汽车列为“十五”和“十一五”计划“863”重大科技项目，并已取得一系列重大科技成果。但是在多年科研实践中，也暴露出一些技术/经济问题：

- 1) 燃料电池系统的耐久性寿命短，一般仅 4000 ~ 5000h，使用周期较短。
- 2) 燃料电池系统的制造成本居高不下，一般为 2 万 ~ 3 万元/kW（国外成本约 2000 ~ 3000 美元/kW），与传统内燃机仅 200 ~ 350 元/kW 相比，差距巨大。由于质子交换膜、炭纸、铂金属催化剂、高纯度石墨粉、氢气循环泵、增压空气泵等关键部件均依靠进口，与国外相比并没有成本优势。
- 3) 燃料电池系统对工作环境的适应性很差，国产系统仅可在 0 ~ 40℃ 气温下工作，低于 0℃ 有结冰问题，高于 40℃ 则会因过热而不能正常工作。此外，系统对空气中的粉尘、一氧化碳、硫化物等都十分敏感，铂催化剂极易污染中毒失效。
- 4) 燃料电池有轨电车的使用成本过于高昂。例如高纯度（99.999%）高压氢（>200bar，即 20MPa）售价约 80 ~ 100 元/kg。按 1kg 氢可发 10kW · h 电能计算，仅燃料费即约为 10 元/kW · h，按燃料电池系统工作寿命 1000h 计算，折旧费为 30 元/kW · h，则总的动力成本达 40 元/kW · h，高于各种动力电池。

9.2.3 氢气系统概述

下面以巴拉德公司的 HD6 燃料电池模块为例进行讲解。

燃料电池系统工作过程中必须向燃料电池提供足够纯度和压力的氢气。所需的氢气流量由 HD6 控制，但是燃料输送系统必须能实时输送所需的燃料。为方便系统维修，在连接到



系统氢气入口前，输氢管道需设置阀门。

为满足反应需要，氢气子系统为燃料电池电堆供应适当压力和湿度的氢气。燃料电池电堆要求氢气压力为 0.5 ~ 1.2bar (0.05 ~ 0.12MPa) 以使反应有效进行。同时，需要维持氢气入口压力比空气入口压力高 0.5bar (0.05MPa)，以避免空气渗透到氢气中（空气渗透到氢气中会降低电堆性能，同时存在着火风险）。

燃料电池系统的氢气供应系统结构如图 9-2-4 所示，外部氢气储存在氢气罐中，进入燃料电池模块的氢气压力高达 18bar (1.8MPa)。氢气进入燃料电池系统后先经过一个压力传感器，然后再由氢气电磁阀控制进入燃料电池模块的氢气供应量。燃料电池模块内部还有一个氢气电磁阀，控制进入燃料电池电堆的氢气供应量。进入燃料电池系统的氢气经过压力调节模块将压力降低到 0.5 ~ 1.2bar 后再进入燃料电池电堆。大部分氢气在电堆中被消耗掉，剩余的氢气经过氢气循环泵加压后返回到燃料电池入口。燃料电池反应产生的液态水流出燃料电池后，经过分水器分离后排出，部分用于空压机后空气的加湿。

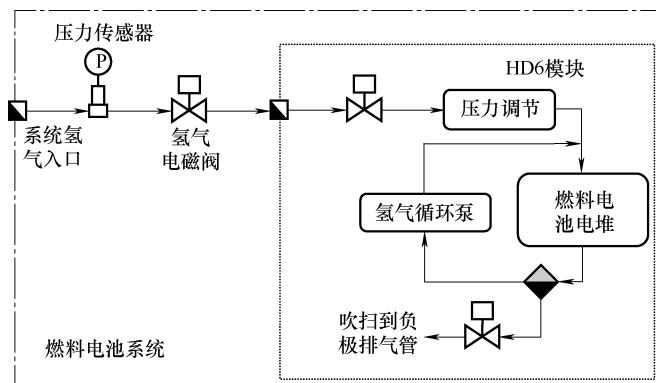


图 9-2-4 氢气供应系统原理

一小部分未反应的氢气也通过排气阀周期性排放，以排出液态水。排气过程中将累积在电堆中的杂质排出，以确保氢气更有效地发生反应。排气会将一部分氢气排到电堆外部，降低氢气利用率，但排气过程是燃料电池操作中必须的步骤。一般会采用氢气传感器监测空气尾气中的氢气浓度，确保其不超过 2%，低于氢气的着火下限。

当燃料电池内部氢气压力超过一定值时，泄压阀打开进行安全泄压。

(1) 氢气纯度要求

燃料电池的工作对于氢气纯度要求极高，必须满足 SAE J2719—2011 中规定的纯度，表 9-2-2 列出了该标准中各种杂质气体的含量范围。对燃料电池系统而言，所列平衡组分中一部分对其性能影响较小，例如水、惰性气体、二氧化碳等，而另外一些杂质组分会对其产生严重毒化作用，主要包括硫化物、甲醛、氨、一氧化碳等，这些组分往往会对燃料电池性能造成不可恢复的影响。而这些组分在煤、天然气等重整法制得的氢气中是常见组分。如果使用重整氢气，例如天然气、甲醇等原料制备的氢气，来操作燃料电池，则需确保杂质气体含量低于要求限值。



表 9-2-2 燃料电池系统氢气纯度要求

组 分	规 格	
水	<5	$\mu\text{mol/mol}$
碳氢化物	<2	$\mu\text{mol/mol}$
氧气 (O_2)	<5	$\mu\text{mol/mol}$
惰性气体 (He , N_2 , Ar)	<100	$\mu\text{mol/mol}$
一氧化碳 (CO)	<0.2	$\mu\text{mol/mol}$
二氧化碳 (CO_2)	<1	$\mu\text{mol/mol}$
硫化物	<0.004	$\mu\text{mol/mol}$
甲醛	<0.01	$\mu\text{mol/mol}$
蚁酸	<0.2	$\mu\text{mol/mol}$
氨	<0.1	$\mu\text{mol/mol}$
卤化物总量	<0.05	$\mu\text{mol/mol}$
微粒大小	<10	μm
微粒浓度	<1	$\mu\text{g/L}$

使用不符合纯度要求的氢气,可能会对燃料电池电堆中的电催化剂造成严重毒化作用,可能使燃料电池电堆产生不可恢复的性能衰减,甚至有可能造成电堆发电能力完全丧失。

(2) 供氢系统压力要求

燃料电池系统使用的氢气必须满足一定压力要求,燃料电池系统入口处的氢气压力要求见表 9-2-3。

表 9-2-3 燃料电池系统氢气压力要求

	规 格
额定入口压力	12bar (1.2MPa)
最小入口压力	9bar (0.9MPa)
最大入口压力	19bar (1.9MPa)

对氢气供应系统而言,氢气减压阀往往与储氢罐距离较近,而减压阀与燃料电池系统氢气入口之间的距离有可能比较远。为满足燃料电池系统入口氢气压力要求,用户需考虑氢气供应系统管路对压力的影响,控制变化量通常是 3 个因素的函数:

- * 压力降:根据调压器特性和管压损失,调压器出口压力随流量的增加而下降。
- * 入口压力:调压器出口压力随入口压力下降而上升。
- * 迟滞:由于调压器内部存在摩擦,流量上升和流量下降时的调压器出口压力曲线之间存在偏移。

在构建供氢系统时,需考虑上述因素的影响,必须确保燃料输送系统的额定运行压力在规定范围内。如果使用高压储氢罐,则氢气系统可能需要两级减压。氢气管路进入燃料电池系统后,安装有一个氢气压力传感器,用于监测氢气压力是否满足系统要求。在 HD6 燃料电池模块入口和燃料电池电堆入口处就安装有氢气压力传感器。当氢气压力低于限值时,系统会自动进入保护性停机状态。但是,如果氢气压力超过系统允许的压力限值,则有可能对



系统造成影响，因此供氢系统需安装过压保护装置，建议组装人员提供电气和机械两级保护：

① 电气保护。如果调压器出口压力超过 23bar（2.3MPa），则燃料输送系统会被电气禁止（例如使用压力开关切断常闭电磁阀电源）。该系统应设置为，当下游压力降低时，氢供应系统不会自动恢复。

② 机械保护。供氢系统需安装一个泄压阀，保持最大流量的压力在 25bar 以下。

(3) 氢气输送系统流速

燃料输送系统必须能实时向 HD6 提供足够的燃料流速以避免燃料不足，见表 9-2-4。

表 9-2-4 供氢系统氢气流速

	流 速 要 求
最大暂态流速	3.0g/s
最大连续流速	2.5g/s
额定功率下预计 BOL 流速	2.1g/s

(4) 氢气系统清洁与排气

氢气储存系统第一次用于燃料电池模块时，使用前必须反复清洗，以确保首次启动的氢气浓度。

如果一个新的氢气供给系统运行造成燃料电池堆电压过低，则原因通常是清洗不充分。如果出现这些问题，则应进行额外清洗，以进一步增加罐内的氢气浓度。

关机时，会有一部分加压氢气被截留在系统供气管道内。用户如果需要拆解维护或检修，则必须排出残留在供气管道中的氢气。

9.3 燃料电池系统的失效分析

9.3.1 燃料电池系统失效方式

燃料电池系统失效包括本质失效和误用失效。本质失效指燃料电池系统自身故障引起的失效，后者则是由外部原因（外部能量使用或其他因素）引起的失效。

(1) 本质失效

燃料电池系统的本质失效包括电堆功能失效和辅助系统（含控制系统）失效。电堆功能失效主要是燃料电池电堆本身组成部件的失效，包括：

1) 质子交换膜失效。主要是腐蚀、老化、脱水等情况造成的膜导电能力下降，以及温度或压力差过高造成的膜穿孔、氢气和空气直接混合等原因造成的失效状况。

2) 电极失效。主要是催化剂活性下降以及水淹、脱落、杂质阻塞等原因导致电极的导电性、扩散层的疏水性和气体扩散性下降，进而造成电堆性能下降等失效状况。

3) 双极板失效。主要是气体流场被液态水或杂质阻塞，引起燃料或空气供应不足，造成电堆性能下降等失效状况。

辅助系统失效主要是执行机构失效和控制器失效，包括：

1) 老化失效。阀门、电机、管道以及系统安装固定等机构老化造成设备工作异常或性



能下降等系统失效。

2) 辅助系统匹配失效。主要是辅助设备的选择或使用不能满足燃料电池电堆工作的相关需求引起的系统失效。

3) 控制品质失效。主要是控制算法本身或硬件电路设计不完善引起的系统参数控制精度和响应速度不足等引起的系统失效。

4) 控制系统误动作。主要是控制系统受到干扰,引起控制软件失效、通信错误等,导致控制系统发出错误指令,从而引起系统失效。

电堆失效和辅助系统失效是息息相关的两个因素,一方面辅助系统失效会导致电堆失效,另一方面电堆失效也会引起辅助系统失效,例如:在输出相同功率的条件下,当电堆性能下降时,就会要求发动机输出更大的电流,引起风机负荷过大,甚至长期超负荷运行,导致风机加速老化甚至故障。相同的输出功率条件下,如果风机出现故障引起氧气供应不足,则必然导致燃料电池极化程度加深,发热量急剧上升,极有可能导致双极板烧坏、变性,从而导致气体泄漏等电堆失效故障。为避免本质失效或减小失效情况给系统带来的负面影响,就要求控制系统必须具备完善的功能以及抗干扰能力。

(2) 误用失效

误用失效指由控制系统和外部设备之间的能量管理协调不当引起的燃料电池系统失效。误用失效主要存在以下情况:

1) 在燃料电池电堆工作状态未达到相应输出功率条件下,外部设备强行增加输出功率,造成输出电流急剧上升,导致系统失效。

2) 在未通知燃料电池电堆工作的条件下,外部设备急剧降低输出功率,造成系统压力波动过大,导致系统失效。

3) 在外部能量需求较小的情况下,要求燃料电池电堆长期运行在满负荷状态引起的燃料电池电堆效率降低,甚至失效的情况。

燃料电池系统失效的最终表现是本质失效,即由外部原因导致的系统本质失效。减少外部原因导致系统本质失效的主要办法,就是提高燃料电池系统的能量管理策略、故障监测能力和容错控制策略。

9.3.2 燃料电池系统的控制系统

燃料电池系统控制系统的功用是确保燃料电池系统工作在良好状态,尽量避免本质失效情况出现,即保证系统的可靠性、安全性和动力性,以及效率处于良好状态。其具体功能包括:根据传感器提供的信息(空气、氢气和循环水各节点的温度和压力以及单体燃料电池电压值)控制燃料电池当前工作状态,达到快速准确地响应外界功率需求的目标,并实时进行系统保护和故障诊断工作,确保燃料电池系统的正常、高效工作。按照燃料电池控制系统的功能,具体可分为控制、通信及故障诊断和保护三个方面。

(1) 控制功能

控制系统不仅要确保燃料电池系统的辅助系统按照适合的工作流程进行工作,还要根据功率输出目标调整电堆的工作温度和供应气体的温度、湿度、压力和流量。控制功能的设计目标:快速性、稳定性和鲁棒性。控制对象分别为空气供应系统、氢气供应系统、水热平衡系统以及能量输出管理控制。



(2) 通信功能

燃料电池系统通过通信功能和上级管理系统进行信息交流，一方面汇报当前的工作状态和相关的工作参数，另一方面接受操作指令并获取当前功率需求的信息。通信装置是燃料电池系统和上级管理系统联系的纽带，其可靠性是避免误用失效的关键。通信功能的设计目标是实时性和可靠性，不仅要具备足够的通信速率和数据处理能力，还要具备较强的抗干扰性。

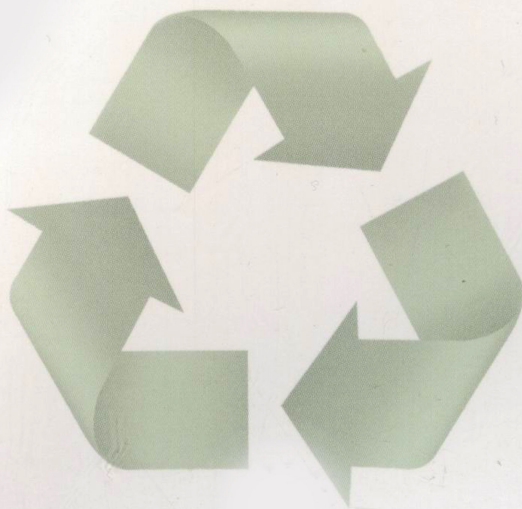
(3) 故障诊断和保护功能

控制系统对燃料电池系统的相关工作参数、执行机构和环境参数进行检测，确定燃料电池系统的工作状态，并对潜在和既有的故障进行相应处理。工作参数的检测包括对供应气体的温度、湿度、流量和压力，以及冷却水的温度、电导率等参数的采样。执行机构检测项目包括离心风机、电磁阀、水泵等执行机构状态。环境参数检测包括环境空气温度、压力和湿度的测量。故障诊断功能是降低系统失效概率的重要手段，并为调整燃料电池系统控制方式提供必要参数。

参 考 文 献

- [1] 科学技术部. 这十年 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2012.
- [2] 中国标准化研究院, 全国氢能标准化技术委员会. 中国氢能产业基础设施发展蓝皮书 [M]. 北京: 中国质检出版社/中国标准出版社, 2016.
- [3] 王庆年, 曾小华, 等. 新能源汽车关键技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [4] 刘吉臻, 等. 新能源电力系统建模与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [5] 刘吉臻, 等. 新能源汽车发展战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [6] 谭晓军. 电动汽车动力电池管理系统设计 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2011.
- [7] 邹政要, 王若平, 等. 新能源汽车技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [8] 李晓华. 新能源汽车技术发展的挑战、机遇和展望 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [9] 王青. 从技术跟随到战略布局 [M]. 上海: 上海远东出版社, 2012.
- [10] 王震坡, 孙逢春. 电动车辆动力电池系统及应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [11] 崔胜民, 韩家军. 新能源汽车概论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [12] 孟玉发, 彭长福, 王选民, 等. CKD6E5000 型混合动力交流传动内燃调车机车的研制 [J]. 铁道机车车辆, 2011, 31 (4): 1-4.
- [13] 杜玉峰, 刘伟. 地铁电动工程车牵引蓄电池参数的确定 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2004, 27 (4): 36-38.

混合动力汽车 / 纯电动汽车 / 燃料电池汽车 / 混合动力列车 / 动力电池技术 / 燃料电池技术 / 能效提升技术



地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号

ISBN 978-7-111-59930-2

策划编辑◎杜凡如 孟阳 / 封面设计◎张静

ISBN 978-7-111-59930-2



9 787111 599302 >

定价：49.80元